ROMAN GALIĆ

KOMUNIKACIJE SATELITIMA

ROMAN GALIĆ: KOMUNIKACIJE SATELITIMA

ROMAN GALIĆ

KOMUNIKACIJE SATELITIMA

ZAGREB 1971.

Knjiga ing. Romana Galića »Komunikacije satelitima« koju izdavački odio Radio-televizije Zagreb predstavlja čitaocima vrijedan je doprinos stručnoj literaturi iz modernog područja satelitske tehnike. Knjiga je rezultat dugotrajnih istraživanja pisca aktualiziranih u skladu s dinamikom fenomena što ih je donijela tehnološka revolucija posljednjih godina. Satelitska tehnika koliko neminovno toliko i uspješno nastupa u svijetu tehničke primjene elektrokomunikacija u dinamičkom kontinuitetu koji iz dana u dan daje nove rezultate i otvara nove mogućnosti. U djelu su obuhvaćena osnovna područja problematike elektroničke elektrokomunikacije i sistematska rješenja koja pruža ova razmjerno nova grana tehničkih znanosti. Djelo je zaokružena cjelina, kakva je danas rijetka u stručnoj literaturi te je ujedno i znanstveni prilog istraživanju u širem razmjeru. Posebna vrijednost djela je u tome što se pojavljuje u vrijeme kada se i u nas razmatraju pripremni radovi na osnovi kojih bi se naša zemlja uključila u svjetsku razmjenu informacija posredstvom satelita.

Satelitska se tehnika općenito, pa tako i onaj njezin dio koji obrađuje kompleks primjene satelita u komunikacijama — razvija eksplozivno. Takav je tempo s jedne strane posljedica, a s druge i stimulans razvoja širokog spektra drugih djelatnosti, razvoja koji i inače daje obilježje vremenu u kojem živimo. Tu izvanrednu dinamičnost pokazuju i svi brojni međunarodni sastanci, neovisno o tome da li tretiraju materiju direktno vezanu na tehnološke probleme ili se bave stvaranjem preporuka, normi i koordinacijom eksploatacije, jednako kao što je pokazuju i ostvarenja s kojima se u svakodnevnom životu susrećemo. U konstelaciji takvog tehnološkog kontinuiteta i njegove dinamičnosti teško je biti ažuran u jednom tekstu za čije je objavljivanje i uz najveći trud svih koji su na tome radili, potrebno vrijeme koje ne može biti prilagođeno brzini zbivanja.

Zemlje u razvoju shvaćaju imperativ vremena da na putu svoje pune emancipacije budu uključene u sistem komunikacija. To je očito na mnogobrojnim primjerima, a motivirano je saznanjima da sudbina čovjeka bez obzira gdje se nalazio, zapravo u velikoj mjeri ovisi o događajima koji se zbivaju relativno daleko od njega, a neposredno utječu i na njegovu sudbinu.

Državna tijela koja se bave vanjskim poslovima često se oslanjaju na određene procedure, institucionalizirane prije više od stopedeset godina. U tehnološkom smislu to odgovara vremenu kada je izumljen parni stroj. Pod takvim uvjetima međunarodna komunikacija i masovni mediji uopće optere-

ćeni su zastarjelom, neadekvatnom i nepogodnom procedurom, kojom su se koristile više institucije, nego narodi i čovječanstvo u cjelini.

U posljednje vrijeme dosta se razmišlja o situaciji koja će nastupiti s razvojem satelitske tehnike. Naravno, svatko od nas raduje se tom trenutku, ali moramo imati hrabrosti da u tome vidimo novu mogućnost monopolizma najjačih. U radu na satelitskoj tehnici nužni su i praktični potezi na zemaljskim vezama — bilateralnim i multilateralnim — za sve potencijalne razmjene programa u pojedinim regionima, među susjedima i onima koji su upućeni da žive jedni s drugima i čiji životni standard u svojoj ukupnosti neposrednije ovisi o njihovoj suradnji.

Knjiga ing. Romana Galića otkriva velike mogućnosti koje se javljaju na području satelitske tehnike i koje otvaraju putove univerzalnoj komunikaciji. Ovaj rad poslužiti će svojoj svrsi ako i najmanje pridonese premošćavanju razlika koje postoje. Kao stručni rad knjiga će također korisno poslužiti diplomiranim inženjerima i tehničarima kao i studentima elektrotehničkih fakulteta.

U Zagrebu, 15. XI 1971.

BILJEŠKA PISCA

Razni su razlozi za pisanje predgovora: u njima se, ponekad, iznosi ono što se htjelo reći na stranicama koje mu slijede, a ponekad ono što se upravo nije htjelo reći. Ja ću ovu bilješku iskoristiti za davanje nekih objašnjenja.

Htio bi, u prvom redu, naglasiti da i meni naslov »Komunikacije satelitima« izgleda pretenciozan. Neovisno o tome što je literatura u obliku knjiga iz ovog područja vrlo oskudna, pa je i komparacija bila gotovo nemoguća, evidentno je da se ovdje radi o fragmentima iz jednog vrlo širokog područja i da je pri tome izbor tih fragmenata, onako kako je dan, bio izvršen na temelju vrlo subjektivnog suda o područjima koja bi trebala predstavljati uvod u komunikacije satelitima. Svjestan toga, odbio sam naslov »Uvod« koji se, na neki način, nametao. Učinio sam to jer je stručna literatura preplavljena »uvodima« koji to vrlo često nisu, a onda i zbog toga što »Uvod« stvara i nameće obaveze: on je s jedne strane prijetnja čitaocu da će autor još jednom još nešto reći, a s druge, i obećanje koje se — vrlo često — nikad ne ispuni.

Ono što se skriva iza naslova »Komunikacije satelitima«, može — posve sigurno — biti samo uvod, što se tiče sadržaja, po količini, poglavljima i načinu obrade, ali nije ni prijetnja ni obećanje da će nastavak slijediti, pa u tom smislu nije ni »Uvod«.

I ako sam imao sreću, u posljednjim godinama, upoznavati se konstantno na nizu međunarodnih sastanaka i raznim radnim grupama, na izvoru, s mnogim novim ostvarenjima, bio sam prisiljen — u mnogim poglavljima — odustati od potrebnih i mogućih dopuna i, ponegdje, korekcija. To načelno ne mijenja ni činjenica da su neke izmjene unešene i nakon »druge revizije«. Time, u ostalom, opravdavam i susretanje — u većoj mjeri nego bi to pedagoški razlozi tražili — u nekim poglavljima, s materijom koja je bila vrlo suvremena kad sam počeo pisati, a danas je, dijelom, prošlost.

U Zagrebu, 10. XI 1971.

Autor

1.

UVOD

Ideja da se informacije prenesu s jednog mjesta na drugo, stara je kao i čovječanstvo. Sredstva i metode koje su pri realizaciji te ideje bili primjenjivani, na izvjestan su način — prilagođena vremenu — u stvari i slika s etapa na putu čovjekova razvoja uopće.

Čudno je, međutim, da na razvojnom putu telekomunikacija dolazi do ponavljanja ideja. Činjenica da je vremenski razmak koji dijeli njihovo sukcesivno pojavljivanje oscilirao između decenija i vjekova, ne mijenja ništa na stvari. Niz ideja napušten je i prihvaćen ponovo u momentu kad se je ukazala nova mogućnost za svladavanje prepreka koje su dovele do napuštanja.

Prepreke su se pojavljivale općenito kad se je radilo o premoštavanju udaljenosti neovisno o tome da li je prijemnik informacija bilo oko ili uho čovjeka, da li je dakle kao sredstvo za prijenos poslužio glas čovjeka, odnosno impresivni zvuk tam-tama ili plamen zapaljenog drveta, svjetlo baklje, dimni signal ili pomični krakovi Chappéovog telegrafa. Svladavanje daljina bilo je vezano na uvođenje posrednika, na stvaranje lanca prenosnika, na ubacivanje onoga, čime se susrećemo i danas kad se za prenos informacija služimo vrlo kratkim Hertzovim valovima.

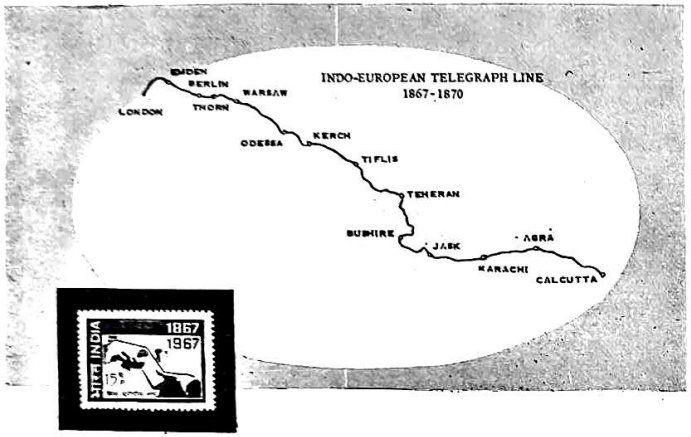
Između primaoca i davaoca informacija bilo je potrebno ubaciti relejne stanice s funkcijom koja je općenito bila ovisna o načinu na koji se je »daljina« manifestirala.

Prirodne zapreke — reljef terena, razvijena vegetacija, oblaci, magla i oborine — sužavaju područje prenosa informacija, neovisno o tome kakav je prenosni medij u pitanju. Osnovno je pri tome ipak da će sve vrste valova, ma kakva im priroda bila obilaziti zapreke s to većom lakoćom, što su ti valovi relativno dulji. Iz ovog slijedi i činjenica da je tam-tam funkcionirao u prašumi, a da je mnogo »moderniji« Chappéov telegraf mogao raditi samo u granicama vidljivosti i to samo po lijepom vremenu; da za komuniciranje putem »dugih« elektromagnetskih valova, udaljenosti — čak i znatne — ne predstavljaju smetnje, dok je uporaba »kratkih« i »vrlo kratkih« elektromagnetskih valova — ako se radi o direktnim vezama (bez iskorištavanja refleksije na Heavisideovim slojevima ili troposferskog rasipanja) — vrlo ograničena.

Ovi isti osnovni razlozi dali su konačno, odmah po izumu stabilnih izvora struje i konstrukciji telegrafa i telefona, tako velik zamah ovim dvama sredstvima veza.

Žice su mogle na velike udaljenosti, po ravnici i preko brda, kroz šume i preko dolina — prenositi informacije bez obzira na vrijeme, godišnje doba i doba dana.

I dosezi ostvareni u to doba ne zaostaju — kad ih smjestimo u vrijeme u kome su ostvareni — mnogo za današnjim ostvarenjima. Sjetimo se samo da je na primjer telegrafska veza Kalkuta—London, dugačka preko 10.000 km (sl. 1.1), izvedena zračnim vodom sa 68.706 stupova, dijelom i danas u pogonu, započeta 1867. g. i završena 1869. godine.



Slika 1.1

Poznato je, međutim, da je nakon nesumnjivog uspjeha »žičnih« telegrafskih i telefonskih veza razvoj telekomunikacija pošao opet drugim putem.

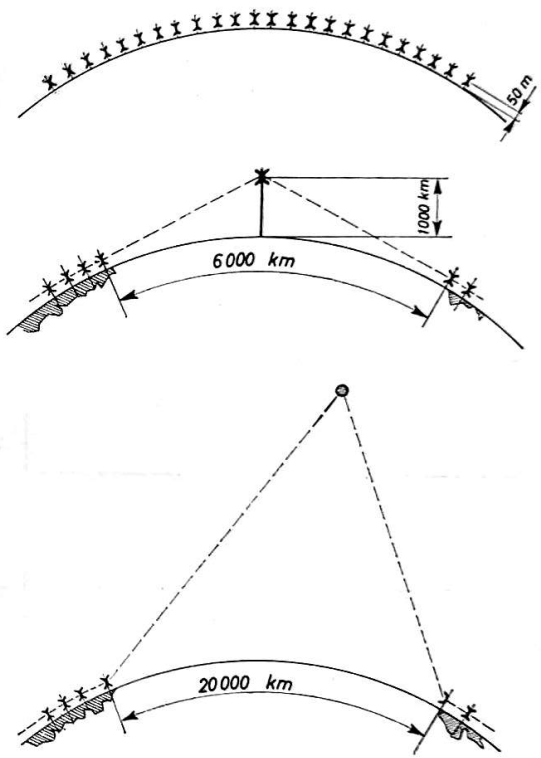
Vratio se sredstvima koja će osjetiti čitav niz zapreka koje su im i ranije onemogućavala uporabu. Sredstva su sada vrlo kratki Hertzovi valovi — elektromagnetski titraji vrlo visokih frekvencija — a jedan od bitnih razloga primjene ovog medija nalazimo u pojačanoj potrebi simultanog prenosa velikog broja informacija — istovremenih telefonskih razgovora, telegrafskih veza ili visokokvalitetnih televizijskih signala — informacija za koje su postojeći zračni vodovi i stari kablovi postali »preuski«.

Neovisno o snazi koja se je mogla naći na strani odašiljača i osjetljivosti prijemnika na strani prijema, nije se s ovim novim sredstvima moglo premostiti udaljenosti koje su išle preko granica radiovidljivosti. To je uostalom vrijedilo i za jedno drugo područje komunikacija u širem smislu — radiodifuziju, a posebice televiziju, koja je također, zbog širine spektra informacija, morala za prenos upotrebljavati nosioce vrlo visokih frekvencija. Jedna od karakteristika komunikacija na frekvencijama iznad kakvih 30—40 MHz izražena je, kako je poznato, činjenicom da je propagacija u korisnom području praktički ograničena horizontom tačke iz koje se energija isijava. Proširenje tog područja moguće je — očito — proširenjem horizonta, a to znači i relativne visine radiatora (sl. 1.2).

Otale i želja da se antene dignu, na bilo kakav način, iznad onoga što omogućavaju prirodne izrasline na površini Zemlje. Nije, dakle, čudo da je lansiranje prvog umjetnog satelita — Sputnjika I — 4. X 1957, otvorilo između

ostaloga i dugo očekivane mogućnosti istovremenog odašiljanja ogromnog broja informacija na velike udaljenosti ili pokrivanje vrlo velikih površina informacijama svih vrsti i prihvatljivog kvaliteta.

Pasivni komunikacioni satelit ECHO I, lansiran u kolovozu 1960, bio je prvo ostvarenje, iako ograničenih mogućnosti. One su bile znatno veće kod prvog aktivnog satelita, dakle satelita s ugrađenim telekomunikacionim uređajima, TELSTAR I, koji je bio lansiran u prosincu 1962. g. Te mogućnosti rasle su sa satelitima koji su slijedili, pa su rezultati postignuti do sada, bilo da se radi o komunikacionim satelitima u užem smislu ili onima lansiranim sa specijalnim namjenama, više nego ohrabrujući poticaj za rad na komunikacionim satelitima s drugim zadacima i mogućnostima.

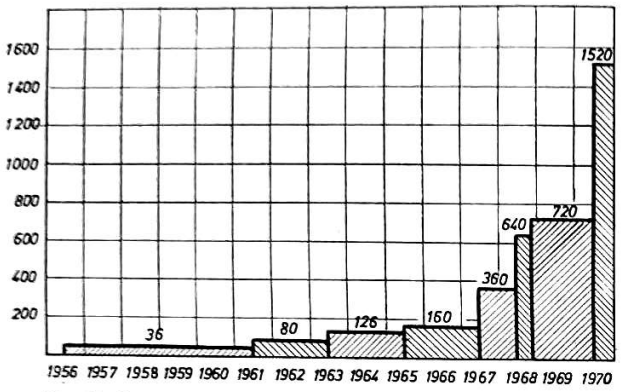


Slika 1.2

Napredak u komunikacijama putem satelita nije, međutim, spriječio ni razvitak ni potrebe na drugim vezama i drugim sredstvima za distribuciju informacija. Kao što je to često slučaj i na drugim područjima, glad za vezama rastao je sa stvaranjem mogućnosti. Mi imamo u stvari pred sobom lančani proces u kome ponuda neposrednih veznih puteva, pouzdanih i dobrog kvaliteta, izaziva odmah po zadovoljenju momentalnih potreba nova traženja i stimulira tako daljnji razvoj.

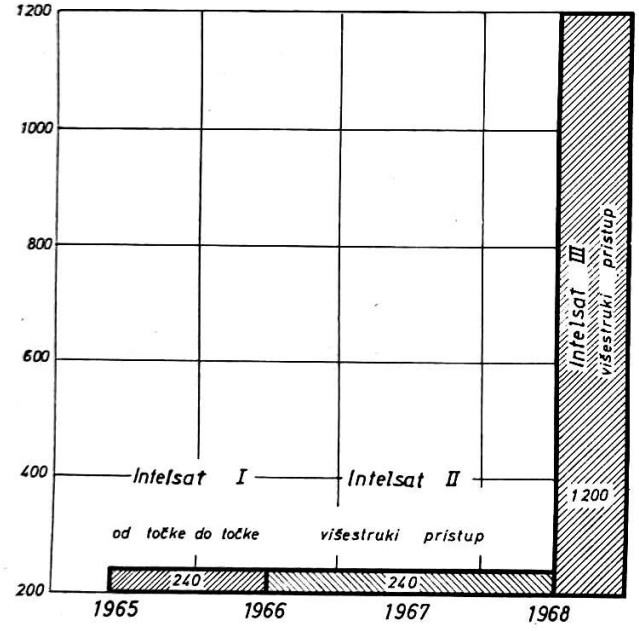
Jedno područje na kome je ovakvo stanje posebno dolazilo do izražaja bile su prekooceanske međukontinentalne veze. Transatlantski kabel, koji je

1956 mogao staviti na raspolaganje 36 kanala postao je odmah »pretijesan«. Iskustva stečena s njime omogućila su prelaz na 80, 160 ili 360 kanala. Razvoj poluvodičke tehnike, posebice u pogledu sigurnosti njezinih elemenata, doveo je odmah do ideje da se sa znatno manjim i ekonomičnijim — u pogledu potroška energije, od onih s elektronkama — pojačalima, posegne za novim



Rast broja razgovornih kanala u transatlanskim kablovima

Slika 1.3



Porast broja raspoloživih kanala u satelitskim vezama

Slika 1.4

ostvarenjima: nastala je nova generacija široko-pojasnih poluvodičkih sistema sa 640 i 1520 kanala, a razvoj u USA pokazuje da bi već 1975 bili raspoloživi i sistemi — konkurentni onima iz satelitskih veza — s 2500 kanala. Razvoj koji je ograničen samo na neposredne mogućnosti prikazan je na slikama 1.3 i 1.4 (1).

Paralelno s podmorskim kablovskim mrežama razvijaju se eksplozivno i sredstva prenosa na kopnu: u pojedinim zemljama, između njih i preko kontinenata. Kabelski sistemi vrlo visokog kapaciteta idu paralelno s nizovima snopova usmjerenih veza za komunikacije u užem smislu te prenos i razdiobu informacija namijenjenih širokoj javnosti — radio-programa i programa televizije.

Na taj način, sateliti s jedne a mreže prenosnih sredstava u zemlji, na zemlji, nad zemljom i u oceanima dopunjuju se tehnički i ekonomski, kao dijelovi jednog integralnog sistema kojem danas razabiremo samo nejasne konture.

Dogledna predviđanja potrebnih veza za neposrednu budućnost, dana u tablicama I i II, samo su jedan od pokazatelja značaja tog sistema, neovisno o tome koliko se međusobno slažu i s kakvim su stupnjevima točnosti dana. Njima bi, da bi se slika upotpunila, trebalo dati podatke o potrebama u distribuciji informacija za široku publiku — programa radija i televizije — i direktnog emitiranja ovog programa sa satelita. Tome će, međutim, biti posvećen dio onoga što slijedi.

TABLICA I

Prema engleskim i američkim procjenama (2), potrebe na telefonskim kanalima (uključivši telegrafiju i telex*) za godinu 1970 i 1980 bile bi:

a) Američka predviđanja	1970	1980
USA — transatlantik	1000	3500
USA — transpacifik	500	2000
USA — Južna Amerika	400	700
Evropa — Afrika	100	?
Evropa — Južna Amerika	200	?
Evropa — Azija	250	?
b) Engleska predviđanja		
USA — Velika Britanija	250	400
USA — Francuska	100	200
USA — Njemačka	115	225
Kanada — Velika Britanija	60	125

Podaci koje daje ATT** za 1960 i 1970 o broju veza na nekim relacijama:

New York — zapadna Evropa	890	5200	22541	35000	2500	9800
New York — centr. Evropa	91	1800	3866	6000	800	3900
New York — istočna Evropa	7	70	1258	3000	40	150
New York — Skandinavija	62	420	2024	8500	250	900
	1960	1970	1960	1970	1960	1970
	× 1000 tel. razgovora		× 1000 telegrama po 10 riječi		× 1000 min. telexa i telefota	

* Telegrafija i prenos data. Jedan telefonski kanal omogućuje prenos dvadeset telegrafskih odnosno telex veza.

** ATT je American Telephone and Telegraph.

Vrijednosti u tablici I dane su na temelju engleskih i američkih procjena nešto ranijeg datuma, dok su one iz tablice II procjene iz krugova UIT-a (Rim 1963).

TABLICA II

	1968	1975
Evropa — Sjeverna Amerika	834	2100
Evropa — Maghreb	468	961
Sjev. Amerika — Južna Amerika	261	675
Evropa — Afrika	190	339
Sjev. Amerika — Krajni istok	90	165
Sjev. Amerika — Afrika	73	109
Sjev. Amerika — Australija	56	103
Evropa — Indija	29	97
Evropa — Južna Amerika	29	94
Evropa — Australija	31	75
Južna Amerika — Južna Azija	46	69
Južna Azija — Krajnji istok	34	51
Evropa — Krajnji istok	27	46
Sjeverna Amerika — Indijski poluotok	13	34

Sve ove arterije, s iznimkom Evropa—Maghreb, mogu se, bez daljnjega, na zadovoljavajući način, rješavati i satelitima.

LITERATURA

(1) *Mackay, Dawidziuk:* Wirtschaftliche, betriebliche und technische Gesichtspunkte moderner Weltweiter Nachrichtensystem, Elektrische Nachrichtenwesen, Bd 43, No 2 — 1968, str. 177—189.

(2) *J. Voge:* Telecommunications internationales par satelites artificiels, L'onde electrique, mai 1963, str. 489.

2.

Klasifikacija komunikacionih satelita

2.1. OPĆENITO

Ograničimo li se na satelite koji su na jedan ili drugi način stalni, integralni dio jednog zemaljskog komunikacionog sistema, uzimajući izraz komunikacije u najširem značenju, možemo satelite grupirati u više skupina a pri tome može klasifikacija biti izvedena s raznih stanovišta.

Historijski bi možda bilo opravdano podijeliti ih na a k t i v n e i p a s i v n e definirajući pri tome:

— aktivne satelite kao relejne stanice, izvedena na jedan ili drugi način tako da nose odgovarajući prijemnik-odašiljač (ili prijemnike-odašiljače) s odgovarajućim napajanjem i antenskim sistemima,
— pasivne satelite kao reflektore elektromagnetskih odnosno radiovalova, oblikovane na jedan ili drugi način, ali uvijek bez ikakvog aktivnog elementa.

Razdioba koja ne vodi računa o gornjim kriterijima izvršila bi se obzirom na visinu satelita. U tom slučaju mogle bi se pojaviti ove tri grupe:

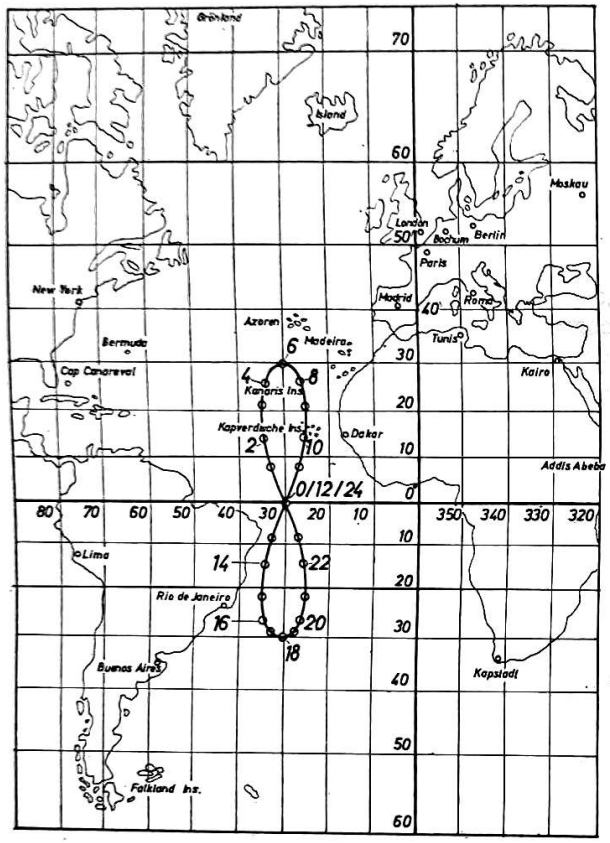
— sateliti koji kruže na manjim visinama: 1000 do 5000 km s periodom 2 do 4 sata,
— sateliti koji kruže na srednjim visinama: 5000 do 20 000 km s periodom 4—12 sati,
— sateliti u sinhronoj orbiti visine cca 36 000 km s periodom od 24 sata.

Parovi vremena trajanja revolucije i visine dani gore, pretpostavljaju da je orbita cirkularna a visine su dane kao visine iznad površine Zemlje.

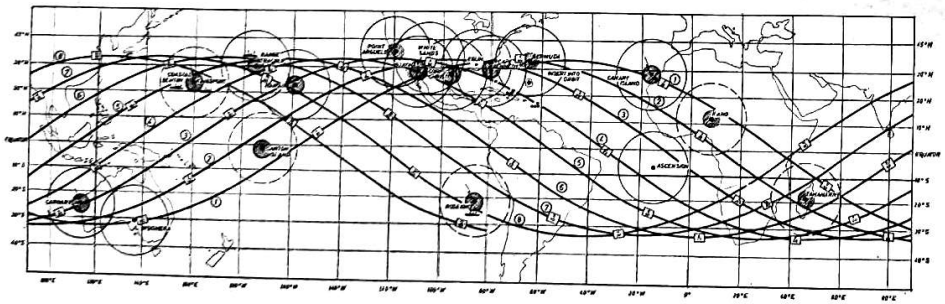
Specijalan slučaj predstavljaju sateliti iz treće grupe — sateliti s kružnom orbitom polumjera 42 241 km (visina iznad Zemlje 35 871 km) i ravninom orbite u ravnini ekvatora Zemlje. Ako im je smjer revolucije jednak smjeru rotacije Zemlje, dakle zapad—istok, trajanje perioda bit će 86 400 sekunda pa će satelit relativno mirovati iznad određene točke na ekvatoru. U tom slučaju govorimo o geostacionarnim satelitima kao specijalnom slučaju sinhronog Zemljinog satelita.

Ako je ravnina orbite nagnuta prema ravnini ekvatora, a orbita je sinhrona orbita, probadat će spojnica satelit-središte Zemlje zemljinu površinu u nizu točaka koje će se nalaziti na zatvorenoj krivulji oblika osmice. Kut nagiba orbite bit će i kut geografske širine tjemena ove osmice. Za jednu sinhronu orbitu s nagibom 30^0 vidi se ovakva jedna osmica na slici 2.1.1 (1),

za satelit koji bi, kad mu ravnina orbite ne bi bila nagnuta, bio stacionaran u zenitu točke 0^0 širine i 30^0 W duljine. Konstrukcija osmice dade se grafički jednostavno izvesti. U vezi sa slikom napominjemo da je »trag« satelita ucrtan u kartu Mercator-ove projekcije, kod koje su meridijani međusobno paralelni ekvidistantni pravci, a paralele pravci čija međusobna udaljenost raste s udaljenošću od ekvatora. Ova projekcija vrlo je zgodna za crtanje tragova satelita



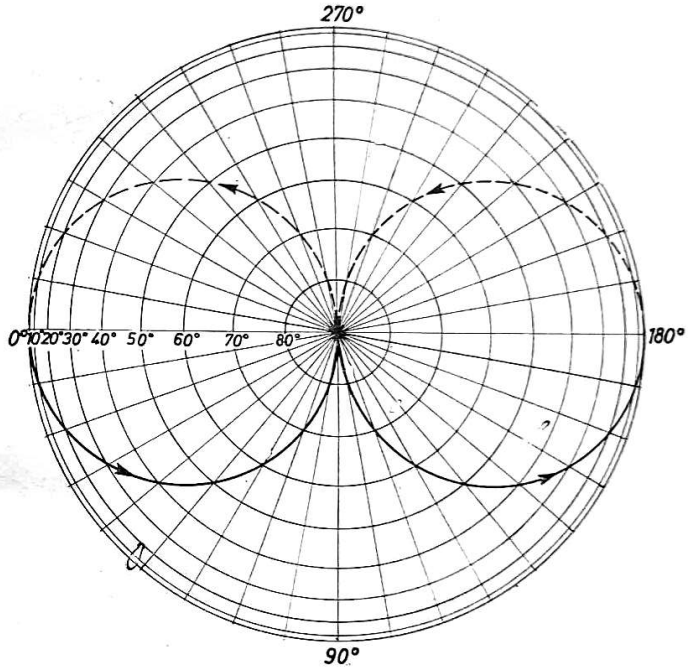
Slika 2.1.1



Slika 2.1.2

s vremenom obilaska ispod sinhronog i ravninom orbite nagnutom prema ekvatoru. Tragovi su sinusoide pa je dovoljno nacrtati samo jednu a njezinim pomicanjem moguće je odrediti trag za bilo koji obilazak poslije toga (vidi sl. 2.1.2). Na slici (2) vide se tragovi prvih 8 obilazaka satelita Gemini 4.

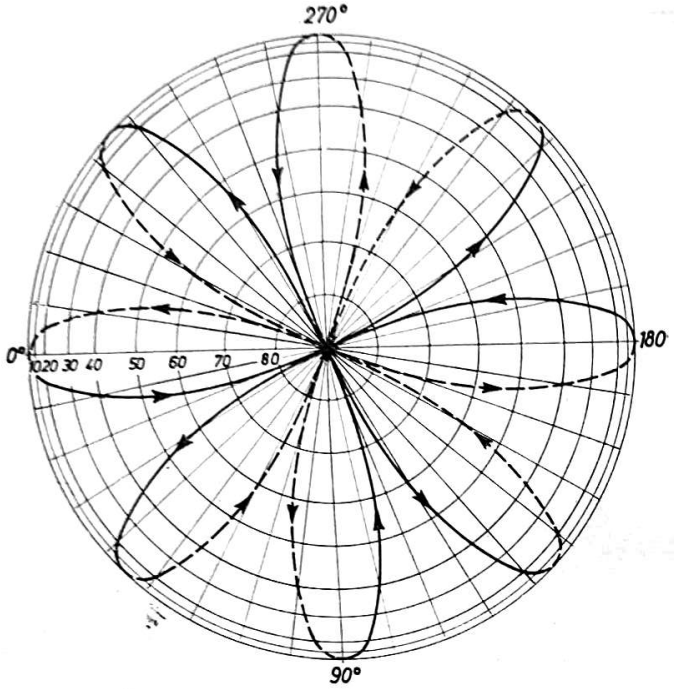
Ako je nagib ravnine prema ekvatoru 90^0 dobivamo polarnu cirkularnu orbitu, dakle orbitu u čijoj je ravnini sadržana i os Zemlje. Ako je vrijeme revolucije satelita i ovdje »sinhrono«, može i polarna orbita biti sinhrona. Relativni položaj satelita mijenja se sada konstantno ali će se satelit, svaka 24 sata, pojavljivati u zenitu istoj točki na zemlji, pa će trag izgledati kao na slici 2.1.3.



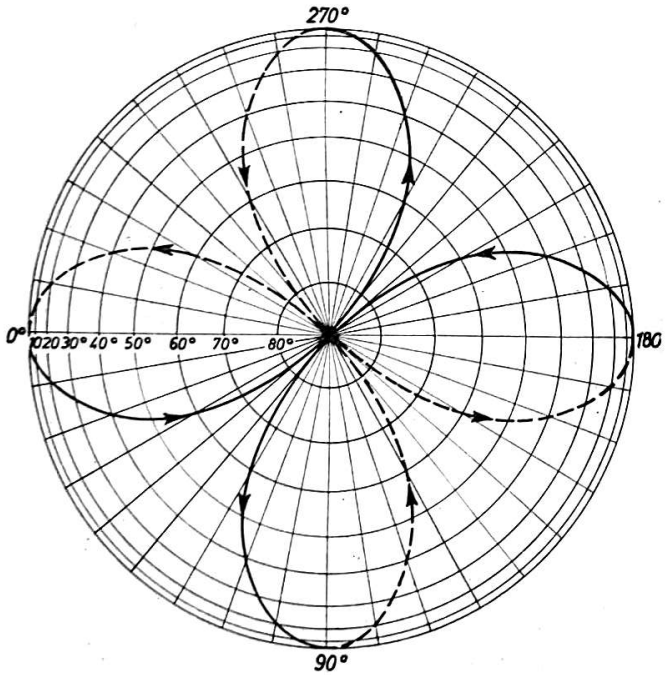
Slika 2.1.3

Za satelite s kružnom orbitom i periodom 12, 8, 6 i 3 sata, s periodom općenito takvim da mu je period rotacije Zemlje cijeli višekratnik, kažemo da su podsinhroni. I kod njih će se satelit pojavljivati periodično u zenitu istih točaka na površini Zemlje. Za 6 i 12 satne polarne orbite, koje mogu biti od interesa za komunikacione satelite, vidimo tragove na slikama 2.1.4 i 2.1.5.

U svim visinama, odnosno sa satelitima svih mogućih perioda, dadu se stvarati sistemi koji s određenim brojem satelita u određenom međusobnom odnosu, osiguravaju, u većem ili manjem procentu vremena, stvaranje neprekidnih veza, u svjetskim razmjerima. Ako oni nisu u fazi, ako dakle nisu sinhroni, a visina i ravnina orbite fiksirane su samo s dosta dobrim stupnjem točnosti, ali sateliti nisu pozicionirani posebno i precizno, imat će oni u sistemu, ako jedan takav tvore, međusobno gibanje s karakteristikama aleatornog gibanja. Napomenimo da je ATT zamislila jedan svjetski sistem komunikacija putem satelita u ovakovoj raspodjeli. Početna koncepcija (3) predviđala je

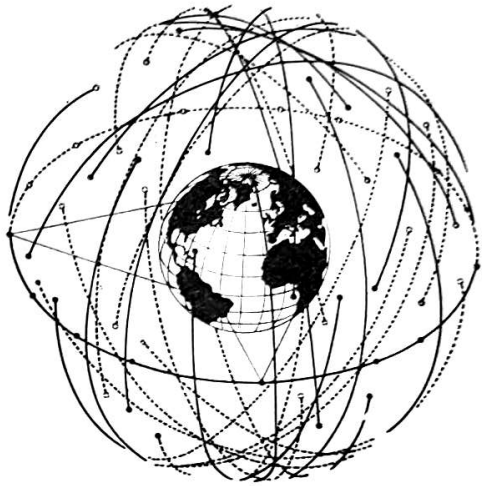


Slika 2.1.4



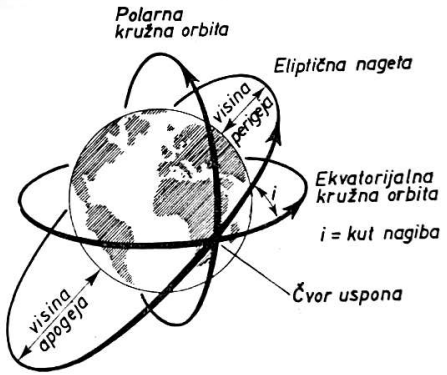
Slika 2.1.5

sistem od 40 satelita na cirkularnoj polarnoj orbiti i 15 satelita na cirkularnoj ekvatorijalnoj orbiti. Svi sateliti kružili bi na 11 000 km visine a njihova raspodjela kao i raspodjela orbita bila bi aleatorna (vidi sliku 2.1.6).

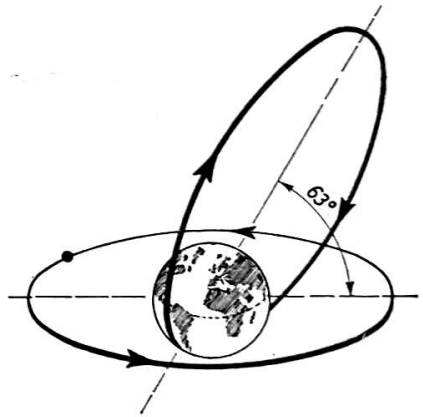


Slika 2.1.6

Umjesto u središtu orbite, može se središte Zemlje nalaziti i u jednom fokusu: radi se u tom slučaju (sl. 2.1.7) o satelitima s eliptičkim orbitama koje



Slika 2.1.7



Slika 2.1.8

imaju osnovnu karakteristiku (II Keplerov zakon) da im je brzina gibanja satelita u blizini apogeja sporija, što znači da će, za povoljno odabrane točke na Zemlji, satelit ostati u području vidljivosti dulje nego bi to bilo u slučaju cirkularne orbite istog trajanja perioda. Evidentno je da za druge parove točaka vidljivost može biti znatno kraća. Posebno je interesantan slučaj eliptične orbite s ravninom nagnutom cca 64° (sl. 2.1.8), kod koje, kako ćemo vidjeti, apogej ostaje na istoj geografskoj širini. Nepotrebno je naglašavati da

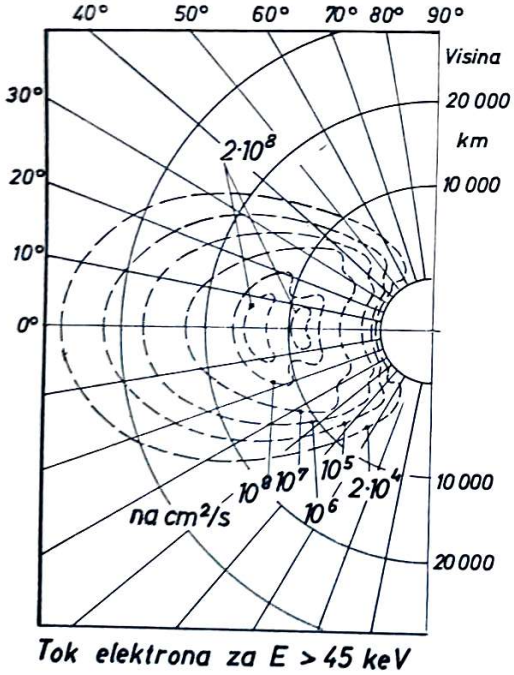
ova orbita ima više prednosti kad se radi o komunikacijama unutar određenih zona, makar i vrlo velikih, nego kad se radi o jednom širem svjetskom sistemu, za koji će cirkularne orbite imati prednosti.

Na oblik orbite, jednako kao i na njezinu visinu, utjecat će i faktori koji nisu direktno vezani na komunikaciona svojstva satelita. Ako za momenat ne uzmemo u obzir činjenicu da će visina biti direktno vezana na mogućnosti satelita koje će sa svoje strane rezultirati iz mogućnosti realizacije dovoljno jakih ili dovoljno ekonomičnih nosioca satelita-raketa odnosno raketnih sistema — ostat će visina s faktorom svojstava ambijenta karakterističnim za tu visinu, elemenat koji neće moći biti zanemaren kod izbora orbite.

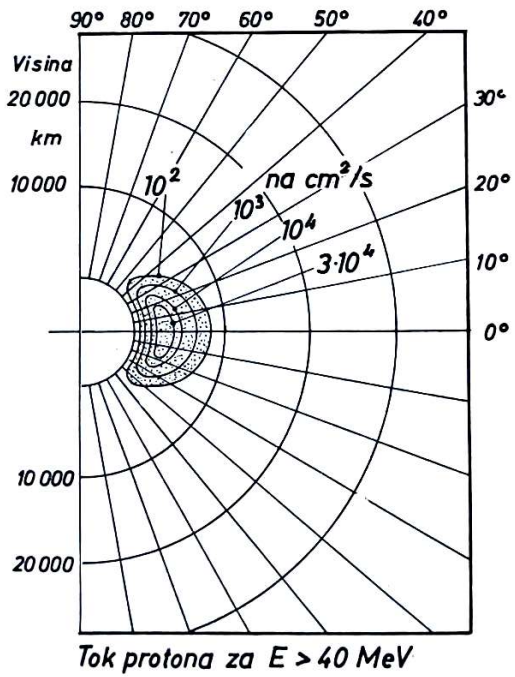
Prostor će u stvari moći djelovati na razne načine raznim svojim, o visini ovisnim, karakteristikama, od kojih bi, kao glavne, mogli navesti: vrlo visoki vakuum (reda 10^{-12} mm Hg za visine 8 000 do 30 000 km), mikrometeoriti (Masa mikrometeorita može varirati između 10^{-3} i 10^{-13} g a njihova relativna brzina prema satelitu 70 do 80 km/sec; najvjerojatnija masa bit će ispod 10^{-4} g a brzina oko 35 km/sec. Mjerenja Explorera XVI dala su masu manju od 10^{-8} g i brzinu 35 do 40 km/sec.), ultravioletna zračenja, kozmička i γ-zračenja.

Sve nabrojene karakteristične pojave mogu djelovati destruktivno na satelite odnosno dijelove satelita u ultraatmosferskom prostoru, svaka — dakako — na svoj način.

Zaštita od bombardiranja mikrometeoritima mehanička je zaštita i može biti relativno jednostavna; vjerojatnost od sudara većim meteorima ekstremno je malena.



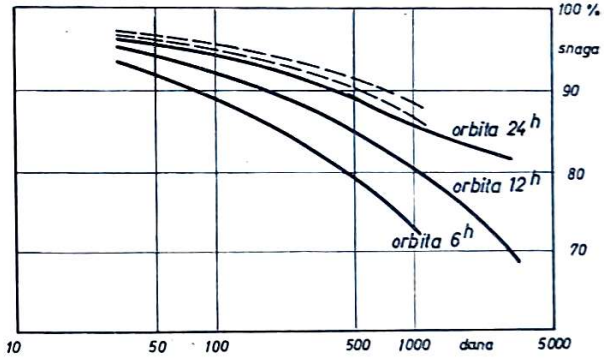
Slika 2.1.9



Slika 2.1.10

Znatno je veća opasnost od oštećenja koja mogu biti izazvana radijacijama fluksa protona s vrlo velikim sadržajem energije. Bombardiranja ove vrste mogu dovesti do izmjene fizikalnih karakteristika elemenata satelita (posebice, na primjer, poluvodiča u sklopovima), odnosno oštećenja komunikacionog dijela satelita. Istraživanja vršena u USA i SSSR pokazala su da postoje dva toroidalna pojasa s ekvatorijalnom ravninom u magnetskoj ekvatorijalnoj ravnini Zemlje. To su poznati Van Allen-ovi pojasevi (sl. 2.1.9 i 2.1.10) od kojih unutrašnji ima visinu do cca 10 000 km i vrlo visoku koncentraciju čestica — pretežno protona — vrlo visokog sadržaja energije (40 do 100 MeV). Vanjski pojas, mnogo deblji, ide od 8 000 do preko 30 000 km,* sadrži visoku koncentraciju elektrona s relativno niskim sadržajem energije (ispod 1 MeV). U znatno većoj udaljenosti (45 000 do 80 000 km) otkriven je i treći pojas čestica s niskim sadržajem energije (4).

Zaštita od čestica ove vrste, posebice u prvom pojasu, tražila bi oklope debljine desetak centimetara, koje — dakako — zbog težine, neće biti moguće realizirati. Osnovni i najefikasniji način zaštite je izbjeći ovu zonu izborom orbite koja neće ležati u njoj. Iz onog što je rečeno uvodno i onog što će još biti rečeno, slijedi da će trebat izbjegavati satelite s orbitama na prelazu između manjih i srednjih visina, primjerice satelita s ekvatorijalnom kružnom orbitom trajanja perioda 6 sati. Orbita s periodom 12 sati ležat će već negdje u drugoj zoni. Eliptične orbite s vrlo velikim nagibom izbjegavaju također, dijelom, dodir s opasnom zonom. Geostacionarna, jednako kao i polarna sinhrona orbita, u ovom su pogledu posebno povoljne.



Slika 2.1.11

Istraživanja vršena TELSTAR-om I, SYNCOM-om II i SYNCOM-om III dala su dovoljno elemenata za određivanje zaštite jednog od elemenata komunikacionih satelita, solarnih baterija, i njihovog držanja tokom vremena. Na slici 2.1.11 su krivulje crtane punom linijom za zaštitni sloj kvarca 0,3 mm a one crtkanom linijom za kvarc 0,8 mm debljine, za razne vrste orbita (5). Vidi se da za životno trajanje ispod 5 godina (1 800 dana) zaštita od

* Podaci koji se u literaturi nalaze o visini i debljini slojeva razlikuju se dosta između sebe. Novija ispitivanja govore čak i o jednom pojasu koji ide do 50 000 km visine.

0,3 mm na orbiti 24 sata i
0,8 mm na orbiti 6 sati

daje istu degradaciju s vremenom. Ako se želi imati isti odnos i kod trajanja života iznad 5 godina, trebalo bi za orbitu 6 sati zaštitu pojačavati.

Neke od elemenata koji bi mogli utjecati na izbor orbite s aspekta njezine visine, susrest ćemo još kasnije (broj terminala na Zemlji, kapaciteti veza i traženi kvalitet, rakete vektori, cijena) ali se već sada, anticipirajući, može reći da je osiguranje trajnosti, obzirom na radijacije, u dovoljnoj mjeri moguće ako se izbjegne prvi Van Allen-ov pojas a to znači ili upotrebu sistema satelita na visini ispod 9 000 km ili iznad 12 000 km. Sateliti na malenim visinama značili bi, kako ćemo vidjeti, malenu »vidljivost« a to znači veliki broj satelita za postizavanje određenog efekta i neprestano dopunjavanje toga broja za održavanje sistema. Visine iznad prvog Van Allen-ovog pojasa vodile bi prema stacionarnim satelitima, ukoliko ne postoje problemi dizanja u stacionarnu orbitu, o kojima će još biti govora, ili vremenskog kašnjenja kod komunikacija, u užem smislu; u ovom slučaju pokazuje se 12 satna orbita (cca 20 000 km) kao najpovoljnija. Eliptične orbite mogu, u slučajevima koji su spomenuti i o kojima će još biti govora, biti iznimno poželjne.

LITERATURA

(1) *Huber:* Antennen und Antennenanlagen für den Empfang der Signale künstlicher Erdsatelliten, RS Mitteilungen No 18, 1964, str. 131—143

(2) *Atkinson:* Space Age Lifeline, Electronic Age, Winter 1965/66, str. 22—24

(3) *Voge:* Telecommunications intercontinentales par satellites arteficiels, OE No 434, 1963, str. 489—502

(4) *Spangler:* Communication Satellites, John Willey, London 1964, str. 50

(5) *Altowsky:* Evolution recente et perspectives des Satellites de Telecommunications. Dokument firme CFTH — Paris

2.2. GEOMETRIJSKI ODNOSI

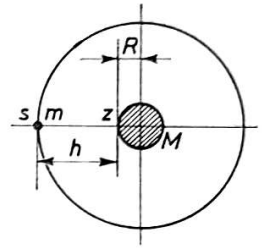
Prije nego pređemo na druga svojstva spomenutih tipova satelita ili orbita, pogledajmo osnovne geometrijske odnose relevantne za telekomunikacione satelite.

Za račun vremena ophodnje satelita na cirkularnoj orbiti, odnosno visine satelita iznad površine Zemlje kojoj je središte istovremeno i središte orbite, služi zakon, izveden iz osnovnih Newtonovih zakona, po kojima će se satelit gibati kao trabant Zemlje ako je centrifugalna sila F_c jednaka sili gravitacije F_g, ako, dakle, vrijedi odnos

$$m\left(\frac{2\pi}{t}\right)^2 (R+h) = \gamma \frac{Mm}{(R+h)^2} \qquad (2.2.1)$$

gdje su (vidi sliku 2.2.1)

m = masa satelita (g)
M = masa Zemlje ($5{,}95 \cdot 10^{27}$ g)
t = vrijeme ophodnje satelita
R = radius Zemlje ($6{,}367 \cdot 10^8$ cm)
h = visina satelita iznad Zemlje (cm)
γ = konstanta gravitacije ($6{,}67 \cdot 10^{-8}$ cm^3 g^{-1} s^{-2})



Slika 2.2.1

Iz gornjeg je

$$t = 2\pi \sqrt{\frac{(R+h)^3}{\gamma M}} \quad \text{sec} \qquad (2.2.2)$$

Visina satelita dana je sa

$$h = \sqrt[3]{\frac{\gamma M t^2}{4\pi^2}} - R$$

$$= 2{,}1573 \cdot 10^6 \sqrt[3]{t^2} - R \quad \text{cm} \qquad (2.2.3)$$

Za prividno vrijeme ophodnje, ako je ravnina orbite satelita istovremeno i ravnina ekvatora Zemlje, a satelit se okreće oko Zemlje u istom smislu u kome Zemlja rotira, imamo:

$$t_a = \frac{t_z \cdot t}{t_z - t} \qquad (2.2.4)$$

gdje je

t_a = prividno vrijeme ophodnje
t = vrijeme ophodnje satelita
t_z = period rotacije Zemlje

Za sinhrone i neke subsinhrone satelite daje (1) vrijednosti za *t* odnosno *h* navedene u tablici I (str. 31). U tablici su i vrijednosti t_a kao i neke o kojima će biti govora kasnije.

Na XI kongresu Međunarodne astronautičke federacije 1960, upozorili su W. F. Hilton i C. Dauncey, u »Communications satelite Orbits«, na važnost — za telekomunikacione satelite — izdužene eliptičke putanje. Pokazali su najprije da orbita s periodom od 12 sati može osigurati korisnu vezu 20 sati na

24. S druge strane, ako je nagib ravnine orbite prema ekvatoru α takav da je ispunjen uvjet

$$5\cos^2\alpha - 1 = 0$$

odnosno

$$\alpha = 63{,}40^0$$

velika je os elipse stacionarna u ravnini orbite a sukcesivni apogeji ponavljaju se za istu geografsku širinu na Zemlji (2).

Prednost ovakve orbite može biti vrlo velika ako se radi o tome da se vrlo malenim brojem satelita osigura neprekidno pokrivanje jedne hemisfere (vidi Tablicu II, str. 31). S druge strane, u usporedbi s cirkularnim orbitama, daje eliptička mogućnost dizanja većeg tereta. Iz tablice III, koja daje relativne vrijednosti, vidi se da prednosti u ovom smislu bivaju manje ako visina perigeja raste.

TABLICA III

Orbitalna visina km	nagib orbite	korisni teret kg
11 130	0	172,3
7 410	90	191,5
16 680—566	63,4	331
16 680—926	63,4	286

Napomenimo da je prvi sovjetski komunikacioni satelit Molnia I, stavljen u orbitu 23. travnja 1965, imao početnu orbitu s apogejom 39 957 km i perigejom 548 km i nagibom orbite 65°. Nakon niza korekcija orbite postignuto je stanje:

period $12^h\ 1/3'$
nagib ravnine orbite 63,35°
apogej 39 592 km
perigej 587 km

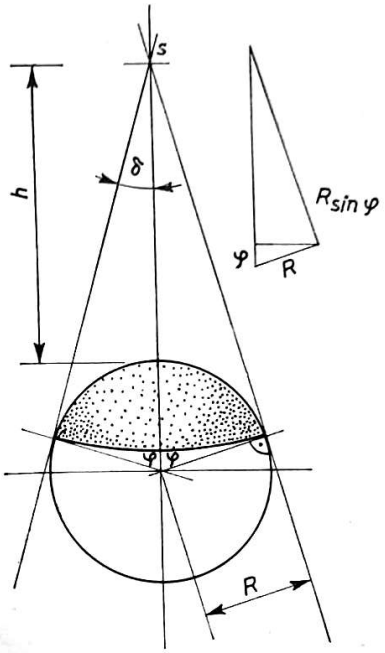
Između Moskve i Vladivostoka osigurava ovaj satelit komunikacije 15 sati dnevno.

Za dvije eliptičke orbite imamo minimalno i maksimalno trajanje vidljivosti na širini 60°, uz prijemnu antenu s kutem elevacije većim od 20°, dano u tablici II. Nagib orbite je 63,4°.

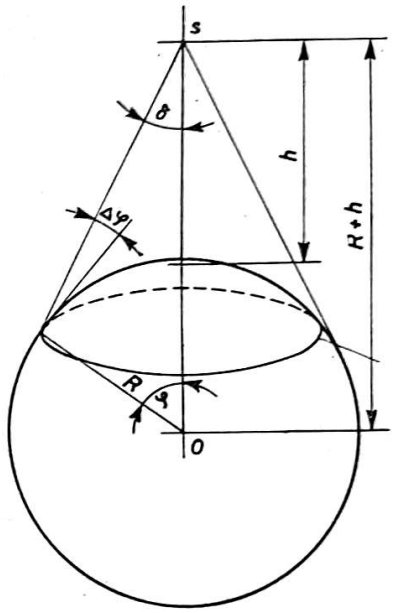
Odnos površina koje se mogu pokriti jednim satelitom, uz pretpostavku da je površina koja je »pokrivena« ograničena kružnicom, dade se izvesti iz par slijedećih slika i izraza:

Kad bi se satelit (sl. 2.2.2) nalazio u visini h iznad Zemlje ili za $(h + R)$ udaljen od središta Zemlje, bila bi površina koju on, uz gornju pretpostavku može pokriti, površina kalote kugle, koja je odrezana konusom s vrhom na mjestu satelita dok bi promjer baze toga konusa bio R_k — R sin φ. S ruba područja koje bi na ovaj način bilo pokriveno, vidio bi se satelit, kad bi Zemlja bila glatka, upravo na horizontu. Ovu situaciju izbjegavali bi, kako ćemo još vidjeti, zbog povećane temperature šuma prijemnog sistema, odnosno povećanog doprinosa temperaturi šuma, prijemnom antenom. I srednje brežuljkasti

teren doveo bi, s druge strane, nužno u pitanje prijem, bilo da se radi o komunikacionim satelitima u užem smislu ili radiodifuznim satelitima, pa bi trebalo nastojati da se, na relativno glatkoj Zemlji, satelit na rubu područja vidi pod kutom $\Delta\varphi$ koji ne bi morao biti veći od 10° niti bi smio biti manji od 5°.



Slika 2.2.2



Slika 2.2.3

Ako je, kako smo rekli, radius Zemlje R, dade se efektivna površina koju satelit pokriva, odrediti iz geometrijskih odnosa sa slike 2.2.3, za satelit udaljen od središta Zemlje za $(R + h)$. Linija koja ograničava vidljivost sada je, dakako, linija u kojoj stožac definiran kao gore, reže Zemlju, a vezana je na centralni kut φ i kut satelita δ slijedećim relacijama:

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - [\Delta\varphi + \sin^{-1}(k\cos\Delta\varphi)] \qquad (2.2.5)$$

gdje je

$$k = \frac{R}{R+h}$$

Za pokrivanje do horizonta sa $\Delta\varphi = 0$, prelazi gornji izraz u

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{2} - \sin^{-1} k \qquad (2.2.5a)$$

kako je, međutim, i za $\Delta\varphi = 10^0$ cos $\Delta\varphi = 0{,}9848 \cong 1$, može se općenito aproksimirati

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \tag{2.2.6}$$

Uz ovako određen φ, možemo za površinu koju satelit pokriva pisati

$$O = 2\pi R^2 (1 - \cos\varphi)$$
$$= 2\pi R^2 \{1 - \sin [\Delta\varphi + \sin^{-1} (k \cos \Delta\varphi)]\} \tag{2.2.7}$$

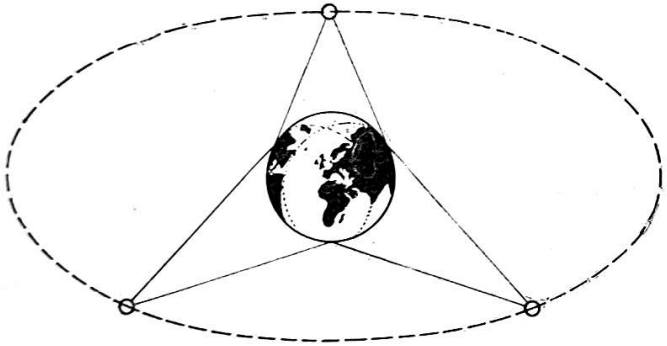
Za geostacionarni satelit, uz $h = 35\,871$ km, $R = 6\,370$ km, odnosno $k = 0{,}1508$ imamo $\varphi_0 = 90^0 - 8^0\,40'\,22'' = 81^0\,19'\,38''$. Površina koju bi satelit pokrivao iznosi

$$O_0 = 2.6370^2 \cdot \pi (1 - \cos\varphi_0) = 216\,444\,105 \text{ km}^2$$

Kako je površina Zemlje 510 082 000 km², »pokriva« teoretski stacionarni satelit 42,45% ukupne zemljine površine. Centralnom kutu $2\varphi_0$ koji odgovara toj površini odgovara, dalje, duljina luka na maksimalnom krugu na kaloti

$$l = \pi R \frac{\varphi_0}{180} = 18\,082{,}5 \text{ km}$$

Iz ovih dviju činjenica slijedi i treća koja se često navodi: s tri stacionarna satelita, razmaknuta na stacionarnoj orbiti za 120⁰, moguće je, kako se vidi na slici 2.2.4, s izvjesnim preklapanjem, vidi sl. 2.2.5, pokriti čitavu nastanjenu Zemlju. Nepokriveni ostaju dijelovi iznad $81^0\,19'\,38''$ na sjeveru i jugu.



Slika 2.2.4

Vratimo se na početno postavljeni uvjet, da kut pod kojim se satelit vidi iznad horizonta, ne bude manji od 5⁰ i uzmimo $\Delta\varphi = 5^0$. U tom je slučaju

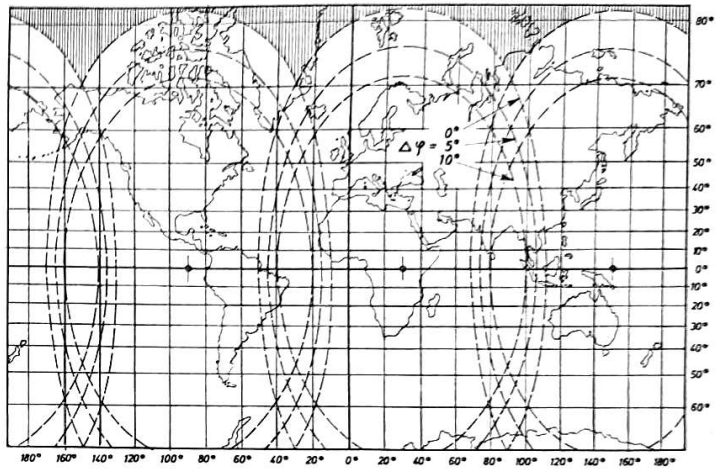
$$\varphi = \frac{\pi}{2} - [5^0 + \sin^{-1} (0{,}1508 \cos 5^0)] = 76^0\,19'\,38''$$

čemu odgovara

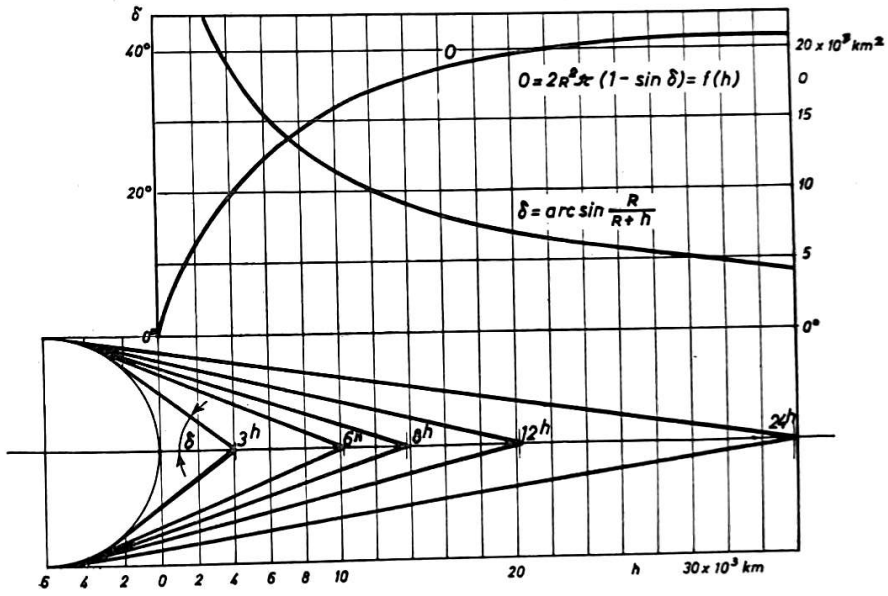
$$l = \pi R \frac{\varphi}{180} = 16\,975{,}7 \text{ km}$$

Efektivna površina je sada oko 195 000 000 km² ili cca 38,2% ukupne zemljine površine. I sada se, dakako, s tri satelita dade »pokriti« čitava nastanjena

Zemlja. Granica pokrivanja bi sada bila na širini cca 76⁰, kako se vidi na slici 2.2.5.



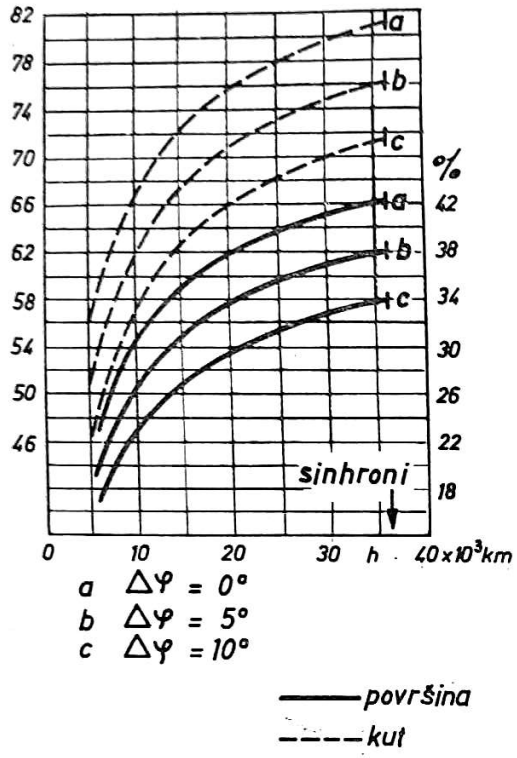
Slika 2.2.5



Slika 2.2.6

Za satelite koji bi se nalazili na drugim visinama, teoretske površine koje bi se dale pokriti vidi se na slici 2.2.6 na kojoj je dan i kut δ koji odgovara tim visinama satelita. Sa slike se vidi da O raste brzo s rastućom visinom h

za manje visine; za veće, kako se može i očekivati, porast je sporiji. Za razne visine vidimo O i φ za $\Delta\varphi = 0^0, 5^0, 10^0$ na slici 2.2.7.



Slika 2.2.7

Za geometrijske odnose kod stacionarnih satelita od važnosti je znati pod kojim se kutom iznad horizonta (elevacija) vidi satelit s pojedinih točaka iz područja s kojeg je vidljivost uopće moguća. Taj kut dan je kao (3):

$$\varepsilon = \frac{\pi}{2} - \mathrm{tg}^{-1}\left(\frac{\sqrt{\sin^2\Delta\cos^2 B + \sin^2 B}}{6{,}62 - \sqrt{1-(\sin^2\Delta\cos^2 B + \sin^2 B}}\right) -$$

$$- \cos^{-1}\sqrt{1-(\sin^2\Delta\cos^2 B + \sin^2 B)} \qquad (2.2.8)$$

Tu je:

B = geografska širina mjesta prijema
Δ = razlika u geografskoj duljini između mjesta prijema i mjesta kome je satelit u zenitu.

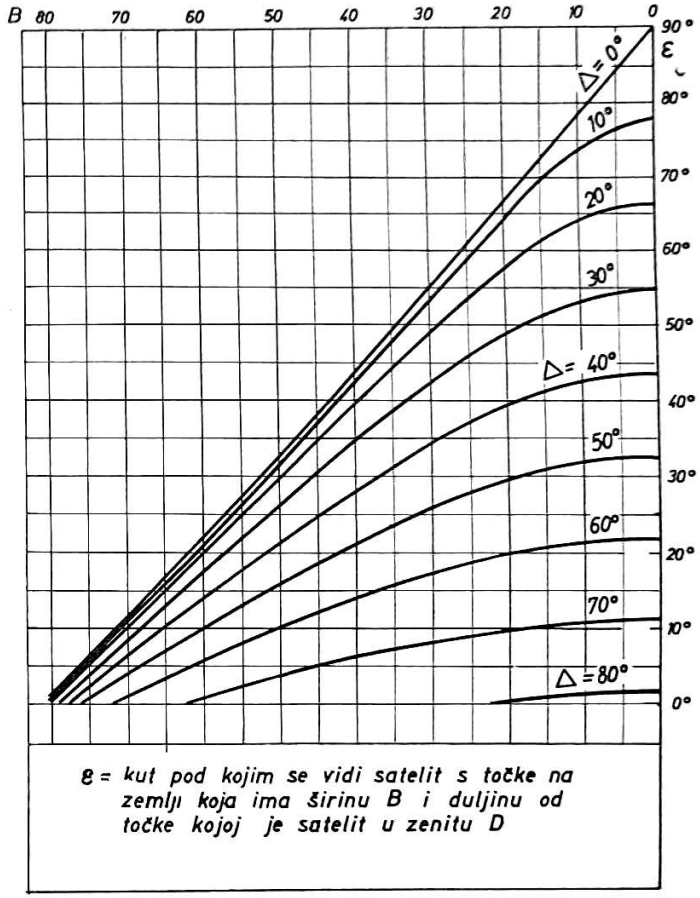
Za razne B i Δ kao parametre, vidimo kut ε na slici 2.2.8 (3).
Za stacionarne satelite možemo kut ε dobiti i iz izraza

$$\varepsilon = \sin^{-1}\frac{(R+h)\cos\Delta\cos B - R}{\sqrt{R^2 + (R+h)^2 + 2R(R+h)\cos\Delta\cos B}} \qquad (2.2.9)$$

uz iste oznake kao gore. Uz $R = 6\,370$ km i $h = 35\,871$ km imamo

$$\varepsilon = \sin^{-1}\frac{42\,241\cos\Delta\cos B - 6\,370}{\sqrt{182{,}5\cdot 10^7 - 53{,}82\cdot 10^7\cos\Delta\cos B}}$$

Niz podataka o problemu pokrivanja dan je u Dodatku.

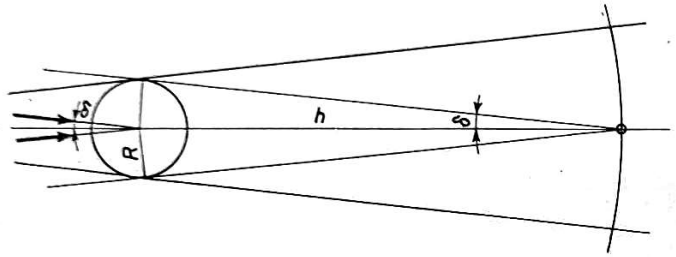


Slika 2.2.8

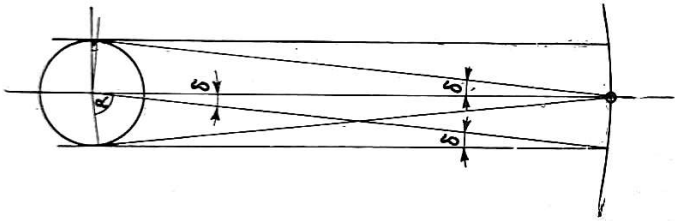
Kao problem koji spada u okvir razmatranja geometrijskih odnosa kod satelita, moramo navesti i problem ulaženja satelita u sjenu Zemlje. Problem je važan jer se svi telekomunikacioni sateliti danas, a vjerojatno i u bližoj budućnosti, opskrbljuju energijom iz solarnih baterija koje, dakako, mogu davati energiju samo ako su osvijetljene.

Pogledajmo kakva je, u tom pogledu, situacija kod jedinih jednoznačno definiranih, geostacionarnih, satelita. Sa slike 2.2.9 slijedi da će satelit dolaziti u sjenu Zemlje u periodu u kome se Sunce nalazi, za ekvator, između

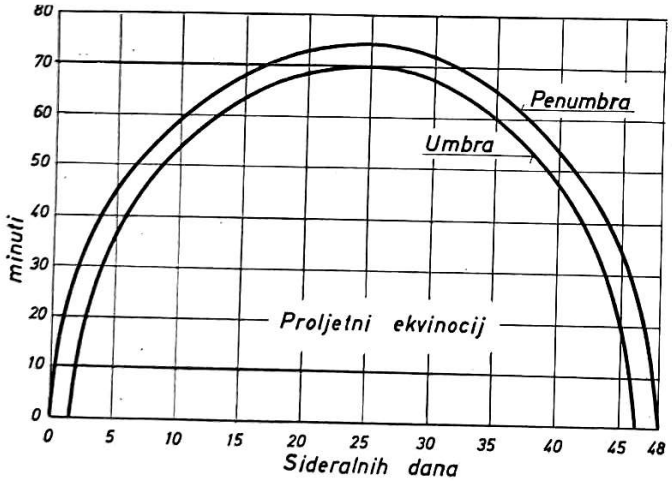
$\pm (90^0 - \delta)$. Kut δ izračunali smo već ranije kao $\delta = 8^0\,40'\,22''$. Na putu prema ljetnom odnosno zimskom solsticiju, dakle za kuteve iznad $8^0\,40'\,22''$ mogućnost ulaženja u sjenu ne postoji. Maksimalno trajanje »pomračenja« satelita ili pomračenja Sunca za satelit, lako je odrediti iz slike 2.2.10 i odnosa duljine luka s centralnim kutem 2δ i opsega stacionarne putanje, izraženog u vremenu. U ekvinokciju, prema tome, stacionarni satelit bio bi u sjeni 4 156,464″, tj. 69,2744′. To vrijeme pada na nulu kad Sunce pređe spomenuti kut δ. Kalendarski, »pomračenje« počinje 23 dana prije ekvinokcija i traje 23 dana poslije svakog ekvinokcija. Maksimalno trajanje izračunato gore pada na dane oko 23. ožujka i 23. rujna i to u ponoć za lokaciju satelita.



Slika 2.2.9



Slika 2.2.10



Slika 2.2.11

TABLICA I

Vrijeme ophodnje (sati)	Visina h		Prividno vrijeme ophodnje (t_a) sati	Maksimalna vidljivost kod svakog prelaza (sati)				Broj dnevnih prelaza preko neke točke
	km	M		na ekvatoru	na $\pm 15^0$ lat	na $\pm 30^0$ lat	na $\pm 45^0$ lat	
24	35 871	22 288	24	trajno	trajno	trajno	trajno	stacionarno
12	20 240	12 576	12	10,1	10,0	9,9	9,3	1
8	13 937	8 860	8	9,8	4,7	4,6	4,2	2
6	10 393	6 459	6	3,0	2,9	2,8	2,5	3
3	4 190	2 603	3,4285	1,0	1,0	0,9	0,6	7

TABLICA II

Vrijeme ophodnje (sati)	Apogej (km)	Perigej (km)	Trajanje vidljivosti na 60^0 širine	
			max	min
12	39 400	1 730	10,6	4,5
8	27 150	729	6,5	2

Ovisnost vremena trajanja sjene od dana za ekvatorijalni satelit vidimo na slici 2.2.11 (4). Na slici prikazano je i trajanje polusjene.

U slučaju duljeg trajanja pomračenja stvarno ispadanje satelita iz pogona može biti dulje od gornjeg vremena, zbog toga što se stvarnom vremenu pomračenja mora pribrojiti i vrijeme potrebno za dovođenje satelita na pravu temperaturu. Do sada je to dodatno vrijeme bilo oko pola sata.

Praktičke konsekvencije pomračenja satelita mogu se smanjiti na taj način da se prekid pogona pomakne na kasnije u noć i to tako da se satelit postavi zapadnije nego što bi to, za dotičnu zonu, bilo potrebno.

LITERATURA

(1) CCIR Corr. 1 uz Doc IV/3 od 2. V 1968

(2) *R. Heppe:* Graphic Methods for Calculating Coverage Attainable with Communications satellites, Electrical communications vol. 39, No 1, 1964, str. 132—143

(3) *Strehl, Fiedler:* Fernseh Versergung grosser Gebiete durch Satelliten, Frequenz Bd 20/1966, No 7, str. 222—233

(4) Doc UN A/AC 105/51, od 26. februara 1969.

3.

Odnos pasivni - aktivni sateliti

U pokušaju klasifikacije satelita mi smo pokušali i historijskim razlozima obraniti raspodjelu na pasivne i aktivne satelite. Ako prvima i ne možemo osporiti ulogu koju su odigrali kao telekomunikacioni sateliti, razvoj aktivnih u svim smjerovima i svim elementima jednog kompleksa kakvog aktivni satelit predstavlja, kao dio sistema, odlučio je igru između pasivnih i aktivnih satelita u korist ovih posljednjih. No, neovisno o tome, postoji nekoliko razloga koji nisu samo historijski, da se i danas pokuša postaviti odnos između ovih dviju osnovnih grupa satelita.

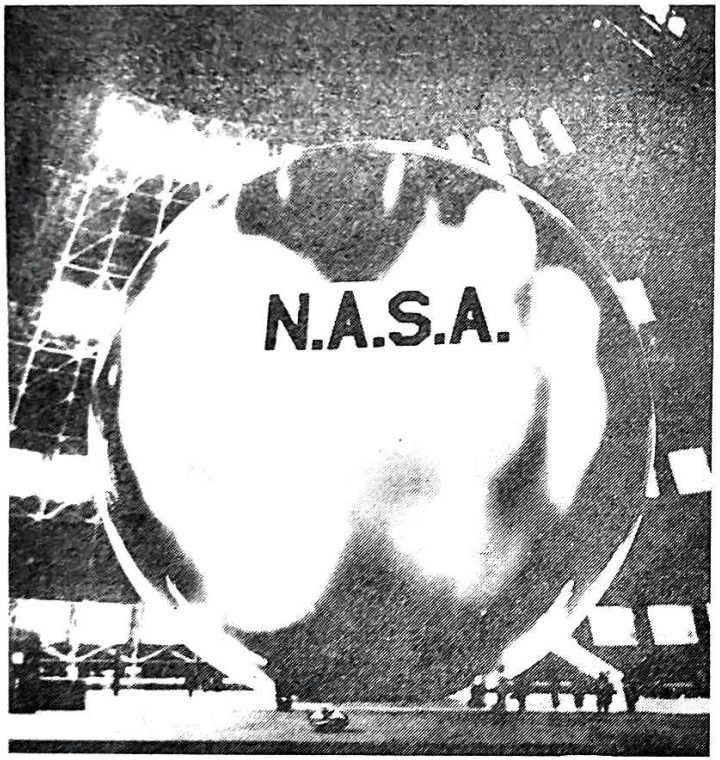
Kao što je uvodno rečeno, pasivni sateliti definirani su već svojim imenom. Njihova privlačnost, nesumnjiva prednost i razlog nesmanjenom interesu za njih, leži u činjenici da ne sadrže nikakav elemenat koji bi se s vremenom kvario, da ne troše energiju i da ih se može — bez opasnosti od interferencija izazvanih samim satelitom — upotrijebiti kao posrednika za po volji velik broj zemaljskih stanica koje se nalaze na površini zajedničke vidljivosti, odnosno na površini koju satelit »pokriva«. Ove prednosti pasivnog satelita sadržavaju u sebi, kako ćemo vidjeti, i njegovu osnovnu manu.

Historija pasivnih satelita može se smatrati vrlo dugačkom kad se uzme u obzir brzina kojom se tehnika satelita općenito razvija: prvi pokušaji, da se, odmah po koncu rata, upute radarski signali na Mjesec, a i pokušaji rađeni ranije, bili su u stvari pokušaji da se iskoristi ondašnji jedini raspoloživi satelit. Činjenica je, da su uz vrlo velike snage koje su bile u pitanju kod emisionih uređaja, vrlo velike antene i osjetljive prijemnike, »kapaciteti« veze bili vrlo ograničeni: veliki gubici propagacije odnosno malena primljena snaga mogli su dati prihvatljiv odnos signal/šum, mjerodavan za kvalitet veze, samo uz vanredno uzak preneseni pojas frekvencija, a to znači uz signal vrlo siromašan informacijama.* Uz ovo su, uostalom, kad je u pitanju bio Mjesec, mogli doći do izražaja i drugi faktori s negativnim utjecajem na kvalitet veze: višestruka refleksija s Mjeseca koji ima vrlo izražen reljef pa onda posljedice Doppler-ovog efekta, koji rezultira iz gibanja obaju tijela.

Ono što se nije moglo realizirati satelitom koji nam je trajno stajao na raspolaganju, nije bilo razlogom za odstupanje od ideje o primjeni pasivnih komunikacionih satelita. Mogućnosti raketne tehnike, kakve su postojale početkom šezdesetih godina i pomanjkanje pouzdanih elektroničkih elemenata,

* 15. svibnja 1959, posredovanjem radioteleskopa Jodrell-Bank bio je prenešen, s Mjesecom kao pasivnim releom, govor na relaciji Evropa—USA.

bili su razlogom da je američka nacionalna administracija za aeronautiku i svemir (NASA) smatrala da umjetni pasivni sateliti mogu biti interesantni za praktičnu primjenu. Sredinom kolovoza 1961. lansiran je komunikacioni pasivni satelit ECHO 1 sa slijedećim osnovnim karakteristikama: kugla promjera 30 m, visina orbite — skoro kružnog oblika — 1 700 km. Balon je bio obložen tankom aluminijskom folijom koja mu je davala svojstva reflektora. S vremenom je pretrpio oštećenja i prestao služiti kao komunikacioni satelit. U ožujku 1968. izgorio je u zemaljskoj atmosferi. ECHO II lansiran je 25. siječnja 1964. (slika 3.1). Konačno formiran bio je i on balon promjera 41,3 m a kružio je u polarnoj orbiti na visini 1 021 do 1 323 km. Stjenke balona bile su napravljene iz dva sloja aluminiuma debljine 5 μ, između kojih je bio sloj mylara debljine 8 μ. Kod dovođenja u orbitu bio je balon složen u kugli, promjera cca 1 m a napuhivanje je bilo izvršeno automatski za 15 do 20 minuta (1).

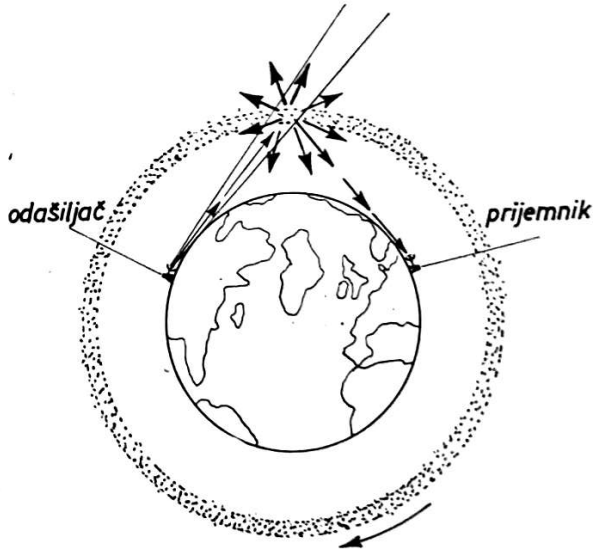


Slika 3.1

Kolika se je važnost davala pasivnim satelitima pokazuje i činjenica da je NASA u toku 1963. imala, u okviru projekta REBOUND, namjeru lansirati jednim nosačem (raketa Atlas-Agena B) tri balona tipa ECHO II u kružnu polarnu orbitu 3 200 km visine i težine svakog po 225 kg. Projekt nije bio realiziran kao ni studije drugih letova pasivnih satelita, od kojih su neki trebali imati direkcionalne karakteristike, što znači uz istu površinu veću koncentraciju energije. S ovim u vezi nametalo se je, dakako, i pitanje stabilizacije satelita i njegove orijentacije prema Zemlji. Ako je za to bilo potrebna energija, velik dio prednosti pasivnog satelita bio je, dakako, izgubljen.

Iako je izazvao oštre proteste sa strane astronoma i radio-astronoma, tehnički je vrlo interesantan bio projekt poznat pod imenom WEST-FORD* (2), (3). U nizu studija pasivnih satelita koje su vršene u USA pokazalo se je da se problem dade riješiti jednim reflektorom posebne vrste — prstenom sastavljenim iz ogromnog mnoštva vanredno laganih metalnih dipola, koji bi kružio oko Zemlje kao Saturnov prsten oko Saturna. Ako bi presjek prstena i gustoća dipola u njemu bili dovoljno veliki, mogao bi on s uspjehom rješavati niz komunikacionih problema na ogromnom području i, usprkos relativno malene udaljenosti od Zemlje, na velikim udaljenostima.

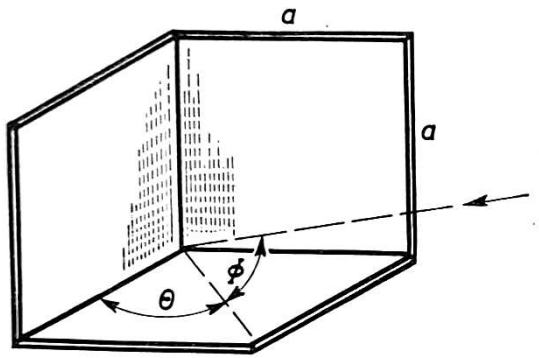
Projekt se je sastojao u lansiranju paketa težine cca 20 kg koji je sadržavao oko 480 milijuna bakrenih iglica — dipola — duljine 1,8 cm i promjera 0,0018 cm. Paket je bio lansiran, bez uspjeha, prvi put 21. X 1961, a 10. V 1963 počelo je uspješno rasipavanje dipola na visini od 3 700 km, u drugom pokusu. Kompaktan oblak iz prve faze postepeno se je razrijedio po orbiti da bi nakon nekoliko mjeseci stvorio jedan toroidealni volumen opsega oko 63 000 km s dubinom presjeka između 15 i 30 km. Gustoća dipola bila je takva da im je prosječna međusobna udaljenost bila oko 400 m. Tako stvoren pojas bio je konačna realizacija projekta WEST-FORD koji je, kako smo rekli, uzvitlao ogroman oblak protesta, jer je po predviđanjima predstavljao u astronomskom smislu, ozbiljno »zagađivanje« svemirskog prostora s mnoštvom smetnji za opservacije. Strah astronoma povećavala su posebice očekivanja da će ovaj projekt uspjeti pa da će, sigurno, biti prvi u nizu realizacija. Sve diskusije koje su vođene oko njega, sa svih mogućih aspekata, pokazale su se ubrzo kao bespredmetne jer je pokus urodio relativnim neuspjehom i bio konačno napušten.



Slika 3.2

* Ime mjesta u kome su vršeni neki pokusi vezani za ovaj projekt.

Kako je projekat trebao osiguravati veze vidimo shematski na slici 3.2. Aktivni dipoli koji se nalaze u volumenu zajedničkom obim snopovima, prijemničke i odašiljačke antene, u stalnom su pokretu, što ima za posljedice brze fadinge i »razmazivanje« signala, zbog propagacije raznim putevima. Uobičajena tehnika frekventne modulacije dolazila je u pitanje zbog nedozvoljeno velikih distorzija, pa je trebalo preći na digitalnu tehniku, mnogo neosjetljiviju na ove vrste smetnji. Kao radna frekvencija bila je upotrebljena frekvencija 8 350 MHz. Usprkos relativno velikoj snazi — klistronski odašiljač s izlaznom snagom 20 kW i antenom promjera 18,3 m (s dobitkom cca 60 db) te prijemnik s maserom i temperaturom šuma cca 60° K — rezultati su bili mogućnost prenosa nekoliko telegrafskih kanala i mjernih vrijednosti ali bez telefonije.



Slika 3.3

Usprkos ovih neuspjeha, gledanih pogotovo današnjim očima aktivnih satelita ogromnih kapaciteta, ideja o pasivnim satelitima pojavljuje se — tu i tamo — ponovno u novim oblicima i novim namjenama: studije kojima je svrha povećati efektivnu površinu satelita za danu masu i upotreba takvih satelita u radiofoniji (4) (5). Pri tome se često misli i na upotrebu drugih tipova pasivnih satelita koji bi, na primjer, imali izražena ili izraženija svojstva da reflektiraju u smjeru iz kojih signal dolazi. Misli se pri tome i na upotrebu »korner reflektora« ili kombinacije više njih. Za pravokutni prostorni ugao zatvoren s tri kvadratične plohe sa stranicama a (slika 3.3), bit će za optimalnu orijentaciju ($\Theta = 45^0$, $\Phi = 35^0\,28'$) refleksiona površina σ dana su

$$\sigma = \frac{12\pi a^4}{\lambda^2} \qquad (3.1)$$

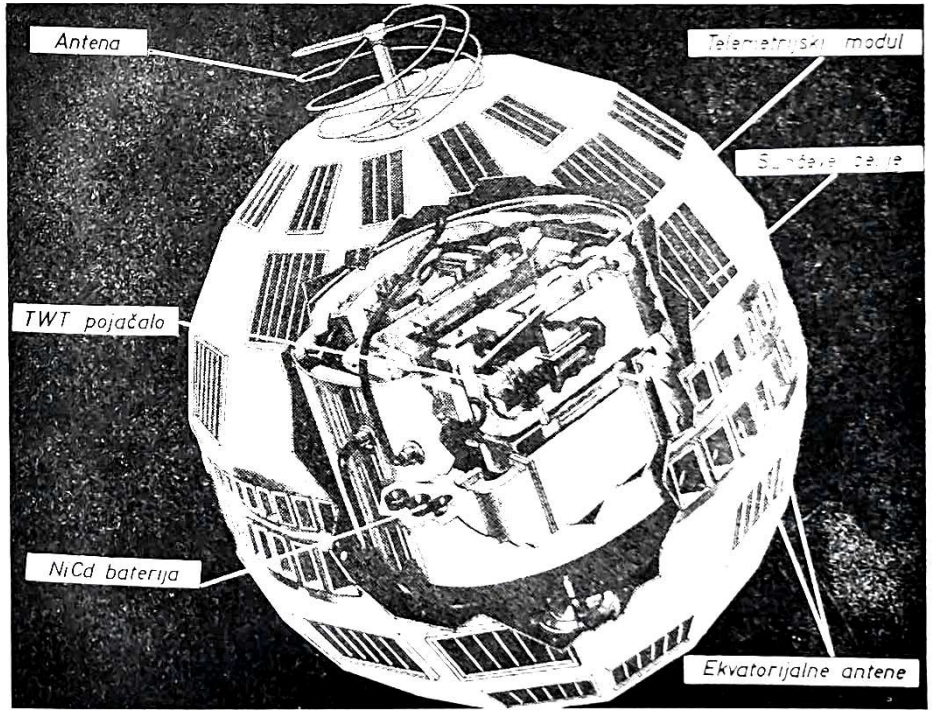
gdje su a, σ i λ dane u jednakim dimenzijama.*

Aktivni sateliti, kao što smo uvodno rekli, trebaju konstantnu opskrbu energijom jer nose uređaje koji su u stanju primljeni signal, između ostalog, emitirati na znatno višem nivou snage nego pasivni satelit.

* Podaci koji se u literaturi nalaze za ovu vrstu reflektora znatno se međusobno razlikuju i uglavnom su krivi. Vidi (6), (7) i (8).

Prvi aktivni komunikacioni satelit, koji je lansiran 18. prosinca 1958, bio je satelit iz projekta SCORE* (9), lansiran raketom Atlas 10 B. Satelit je kružio u orbiti koja je imala početni nagib 30°, perigej 180 km, apogej 910 km. Odašiljač snage 8 W s frekvencijom 132 MHz i prijemnik s faktorom šuma 10 db, ugođen na 150 MHz bili su montirani na satelit uz odašiljač za praćenje i uređaj za registraciju i reprodukciju koji je trebao služiti za odložene, tj. vremenski pomaknute komunikacije, te baterije. Defekat na uređaju za registraciju prouzrokovao je kontinuirani pogon odašiljača i prijevremeno iscrpljenje baterija te prekinuo, 30. XII iste godine, rad ovog satelita koji je pokazao mogućnosti komunikacija, u svjetskim razmjerima, aktivnim satelitima.

Slijedeći satelit iz projekta COURIER lansiran je 4. listopada 1960 u eliptičku orbitu s početnim nagibom ravnine 28°, apogejom 1 350 km i perigejom 950 km. Satelit je bio kugla promjera 130 cm i težine 228 kg. Radio je sa solarnim baterijama (20 000 silicium ćelija). Kao komunikacioni satelit radio je u području 2 000 MHz u korespondenciji s jednom zemaljskom stanicom u New Jersey-u a drugom u Porto-Rico-u. Kao i SCORE, primao je i registrirao vijesti primljene pri prolazu kroz zonu prijema jedne stanice i emitirao pri prolazu kroz područje prijema druge. Ovo vrijeme iznosilo je 10 do 15 minuta po prolazu.

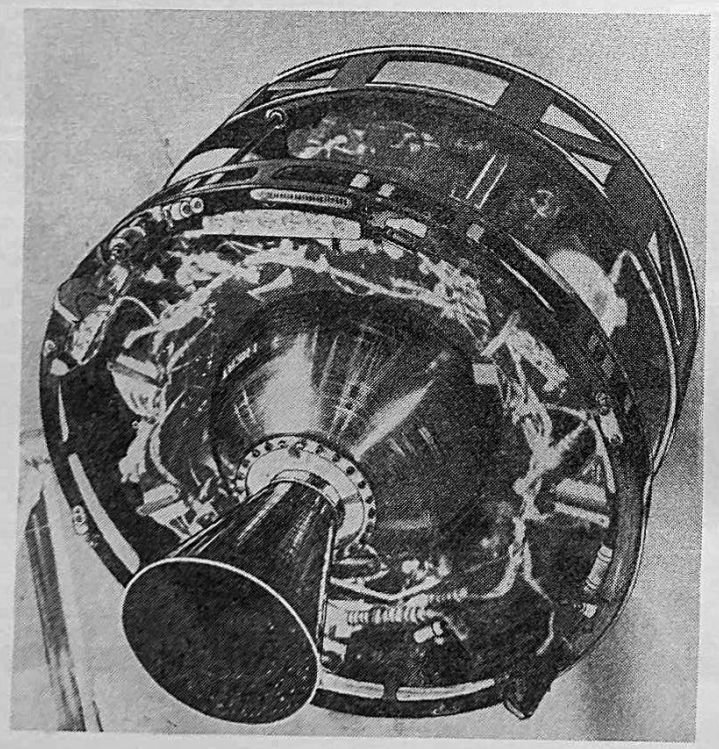


Slika 3.4

* Signal Communication by Orbiting Relay Experiment.

U 1962 (10. srpnja) lansiran je slijedeći aktivni satelit TELSTAR (sl. 3.4), prvi satelit koji je omogućio međukontinentalne telefonske veze putem satelita i direktni prenos TV-programa preko Atlantika. TELSTAR je, dakle, prvi aktivni satelit u današnjem značenju. Satelit je imao izduženu eliptičku orbitu s nagibom 44,8°, perigejom 935 km, apogejom 5 685 km i vremenom ophođenja 158 minuta. Ovaj satelit koji je emitirao na 4 710 MHz i primao na 6 390 MHz, korespondirajući sa stanicama Andover (USA), Pleumeur Bodou (Francuska), Goonhilly Downs (Engleska), interesantan je kao tehničko dostignuće i po još jednoj činjenici: 23. studenog TELSTAR je prestao raditi zbog neispravnih uvjeta rada jednog tranzistora, što je konstatirano u kontrolnoj stanici na Zemlji. Za vraćanje u normalno stanje bilo je potrebno skinuti, za dulje vrijeme, napon s ovog tranzistora što je izgledalo nemoguće jer je za rad telekomandi trebalo da i taj tranzistor bude u pogonu. Nakon jedne vanredno opsežne studije, uputili su tehničari ATT-a posebno formiran signal koji je omogućio iskapčanje baterije i vraćanje u normalno stanje: 3. siječnja 1963 satelit je opet proradio da bi 5. veljače prestao definitivno raditi zbog kvara na telekomandnom sistemu.

Koncem 1962 (13. prosinca) lansiran je prvi satelit iz serije RELAY s orbitom karakteriziranom inklinacijom 47,5°, apogejom 7 423 km, perigejom 1 312 km i vremenom ophođenja 185,1 minute. Satelit je u početku bio u nemogućnosti da radi kao komunikacioni satelit zbog neispravnog funkcioniranja solarnih baterija. Situacija se je nakon cca tri tjedna popravila i RELAY



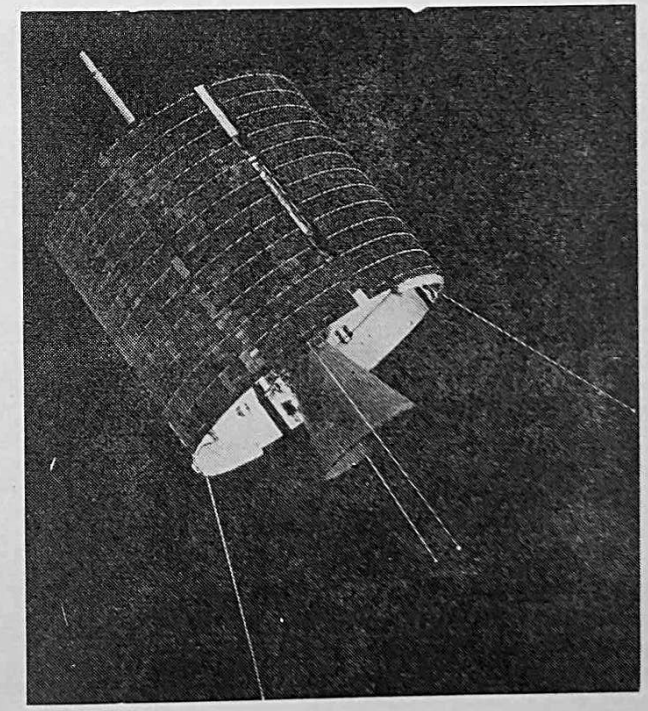
Slika 3.5

je s uspjehom izvršio niz transkontinentalnih prenosa TV-programa, između ostalog i posjetu predsjednika Kennedy-a Evropi u 1963. Prestao je raditi koncem 1964.

U 1963, 14. veljače, lansiran je SYNCOM I (sl. 3.5) koji je trebao biti prvi sinhroni satelit. Zbog izostanka veze sa Zemljom, nije uspio kao komunikacioni satelit. Par mjeseci kasnije (7. svibnja lansiran je TELSTAR II s karakteristikama sličnim onima TELSTARA I, samo s orbitom koja je imala nešto manji nagib (42,7°) ali znatno veće izduženje (perigej 969, apogej 10 793 km) da bi zadržavanje u Van Allenovom pojasu bilo skraćeno. Ovim satelitom izvršen je 16. travnja prvi direktni prenos Japan—Evropa. Satelit nije više aktivan.

U istoj godini (1963), 26. srpnja, lansiran je SYNCOM II s periodom 1454 minute, apogejom 36 627 km i perigejom 35 520 km i nagibom orbite 33,1°. Ovaj satelit nije bio predviđen za prenos TV-signala i ako su pokusi prenosa signala TV, s uskim pojasom, izvršeni. Vršio je, međutim, nebrojene veze između Amerike, Evrope i Afrike, prenoseći radio-programe, telefoniju i telex signale. Vršeni su njime i prvi pokusi višestrukog pristupa.

Početkom 1964 (21. siječnja) lansiran je drugi satelit iz serije RELAY s orbitom koja je bila karakterizirana inklinacijom 46,0°, apogejom 7 413 km i perigejom 2 088 km. Vrijeme ophodnje bilo je 194,7 min. Kao i prvi iz ove serije imao je RELAY II dva širokopojasna prijemnika koji su, preko pretvarača, signal primljen na 1 725 MHz emitirali na 4 080 MHz. Efektivna isijana snaga bila je cca 10 W. Kvalitet prijenosa ovim satelitom bio je u nekim točkama iznad traženja u odgovarajućim preporukama CCIR-a, a svi pokusi napravljeni ovim satelitima bili su okrunjeni uspjehom.

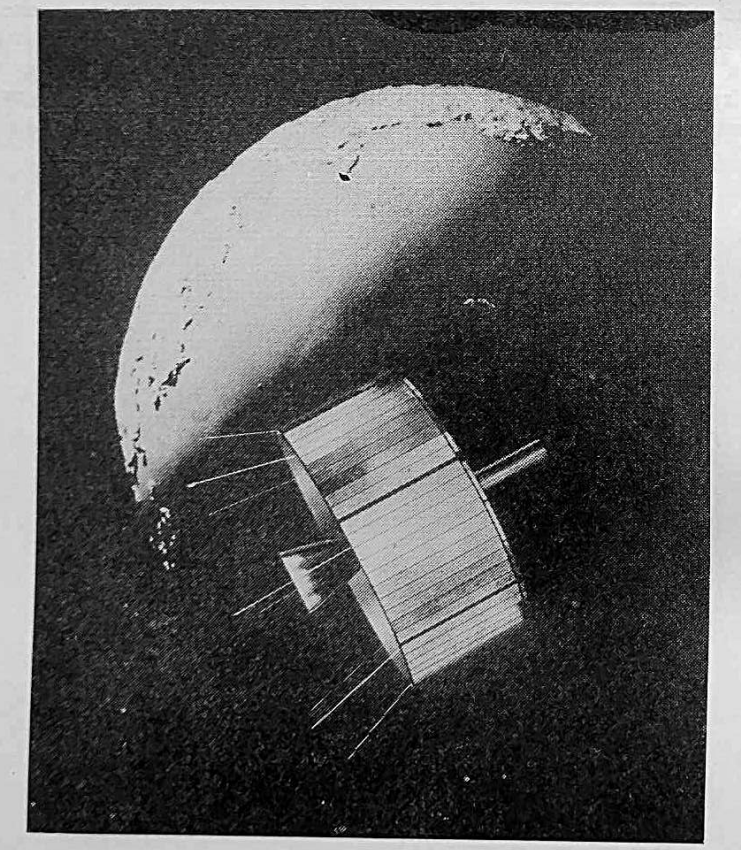


Slika 3.6

Treći iz serije SYNCOM (SYNCOM III) lansiran je 19. VIII 1964. s karakteristikama sličnim ostalima iz ove serije (inklinacija 0,31°, apogej 36 354, perigej 34 776 km, vrijeme ophodnje 1 423 minute).

Ovaj je satelit posredovao prenos Olimpijskih igara među točkama Kashima (Japan) i Point Mugu (Kalifornija); učestvovao je u bilateralnim vezama s komercijalnim avionima. Iskustva s ranijim satelitima bila su povodom da se ovaj opremi novim solarnim baterijama koje su oslabile samo za 5% u prvih 500 dana rada. SYNCOM III bi po svojstvima svojih baterija morao raditi barem 15 godina. Rezerva goriva (H_2O_2) za držanje u položaju može, međutim, trajati samo do 1970.

Iz serije INTELSAT lansiran je prvi satelit 6. IV 1965, pod imenom EARLY BIRD (sl. 3.6). Satelit se nalazi gotovo na geostacionarnoj orbiti (apogej 35 827 km, perigej 35 756, inklinacija 2,7°, vrijeme ophodnje 1 436,3 minute, klizanje 0,11° dnevno na zapad), centriran iznad 25,7° zapadne duljine. Satelit ima dva prijemnika na 6 301,02 i 6 389,97 MHz i dva odašiljača na 4 081 i 4 160,75 MHz s EIRP za svakoga po 10 W. Antena ima toroidalnu prostornu karakteristiku. Mrežu s ovim satelitom tvore zemaljske stanice Andover, Goonhily, Pleumeur Bodou, Raisting (Njemačka) i Fucino (Italija). Ovaj satelit deaktiviran je i povučen u rezervu 18. I 1969. Iz ove serije su i sateliti LANI BIRD I, LANI BIRD II, CANARI BIRD i PACIFIC.



Slika 3.7

LANI BIRD I prvi je iz INTELSAT serije »postavljen« iznad Pacifika. Kako, međutim, nije uspio ući u sinhronu orbitu (orbita ima apogej 37 534 km a perigej 3 422 km) raspoloživ je samo 8 sati dnevno. LANI BIRD II lansiran je 11. siječnja 1967 kao transpacifički satelit. Ima i oznaku INTELSAT II F2 (sl. 3.7). Stacioniran je iznad 180° E, ima nagib orbite 1°, perigej 35 775 km a apogej 35 801 km, s vremenom ophodnje 1 436,3 minute. Prima na 6 346 MHz a emitira na 4 121 MHz sa snagom 24 W.

Pod imenom CANARI BIRD ili INTELSAT II F3 lansiran je 23. III 1967, daljnji stacionarni satelit iznad Atlantskog oceana (6° W) s karakteristikama gotovo jednakim prethodnom (INTELSAT II F2): nagib orbite 0,4°, apogej 35 795 km, perigej 35 774, period 1 436 minuta. Snaga kao i frekvencije jednake onima iz INTELSATA II F2.

Kao PACIFIC II ili INTELSAT II F4 lansiran je nad Pacifikom (180° E) 27. IX 1967 četvrti iz serije INTELSAT II. Karakteristike orbite: nagib 0,4°, period 1 436,5 minuta, apogej 35 801 km, perigej 35 782 km. Odašiljač i frekvencije kao F2.

Sva četiri ova satelita imaju jednaku težinu, tj. 162 kg, kapacitet veze 240 telefonskih kanala visokog kvaliteta ili jedan televizijski. Napajanje iz solarnih baterija.

Slika 3.8

Pod konac 1968 (19. XII) lansiran je u stacionarnu orbitu satelit iz familije INTELSAT III (sl. 3.8) iznad 31° W. Karakteristike orbite ovog satelita su: inklinacija 0,7°, apogej 35 790 km, perigej 35 770 km, period 1 435,9 minuta.

Frekvencija prijema 6 042,5 i 6 307 MHz a emitiranja 3 817,5, 3 967 (telemjerenja) i 4 082 MHz. Kapacitet satelita je 1 200 telefonskih kanala ili 4 televizijska.

Iz ove iste serije lansiran je 6. III 1969 satelit s oznakom INTELSAT III F3 s kapacitetom kao i prethodni. Ostale karakteristike: apogej 35 806 km, perigej 35 786 km, inklinacija 1,3°, period 1 435,4 minute, prijemne frekvencije 6 042,5 i 6 379,5 MHz, odašiljačke (12 W) 3 817,5 i 4 082 MHz te telemjerenja na 3 967 MHz (0,45 W). Satelit je »stacionaran« u zenitu točke 173,88° E.

Prema (10) bili su koncem kolovoza 1969. u orbiti komunikacioni sateliti: EARLY BIRD koji nije u pogonu ali se može reaktivirati, INTELSAT II F3 u upotrebi do sredine kolovoza zbog povremenog ispadanja satelita INTELSAT III F2 (upotrebljava se i za NASCOM), INTELSAT III F2 u komercijalnoj upotrebi (neprekidni rad ovog satelita nastavljen je ponovno 2. kolovoza, nakon što je sistem za proturotaciju antene ponovno počeo funkcionirati), INTELSAT II F2 nije u upotrebi ali se može po potrebi aktivirati, INTELSAT II F4 u istom je stanju kao i prethodni, INTELSAT III F2, F3 i F4.

INTELSAT III F1 nije ušao u orbitu kao ni kasnije (srpanj 1969) lansirani INTELSAT III F5.

U siječnju odnosno travnju 1970. lansirana su još 2 satelita iz serije INTELSAT III; jedan je stacionaran iznad 28° W a drugi iznad 20° W. U srpnju 1970. lansiran je, konačno, još jedan satelit iz ove serije, ali on nije ušao u stacionarnu orbitu.

Iz serije aktivnih komunikacionih satelita ne smije se ispustiti niti 17 (do 25. XII 1970.) satelita tipa MOLNIA I. Karakteristike nekih od njih su:

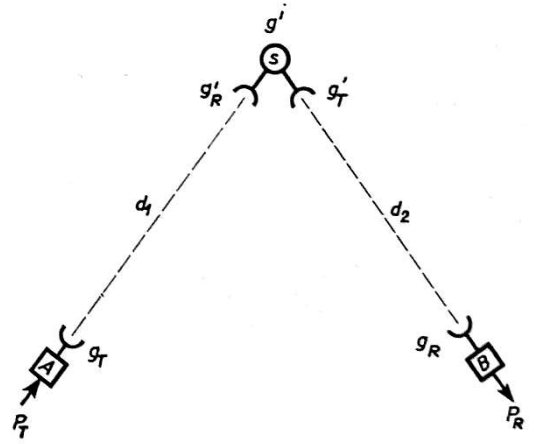
Naziv	Lansiran	Perigej/apogej (km)	Period inklinacija (min) (°)
MOLNIA I 5	25. V 1967.	774/39 265	717,7/64,8
MOLNIA I 6	3. X 1967.	415/39 913	717,2/64,9
MOLNIA I 7	22. X 1967.	949/40 261	735,1/64,1
MOLNIA I 8	21. IV 1968.	819/39 524	717,5/65,1
MOLNIA I 9	5. VII 1968.	563/39 779	717/65
MOLNIA I 10	5. X 1968.	437/39 930	718/65,1
.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....
MOLNIA I 17	25. XII 1970.	480/39 600	712/65

Svi ovi sateliti istog su tipa a rade u mreži »ORBITA« koja vrši distribuciju TV-programa. U tom je slučaju prijemna frekvencija u pojasu 1000 MHz a emisiona u pojasu 800 MHz. Snaga isijana sa satelita je 40 W a satelit se napaja iz solarnih baterija. Drugi dio satelita radi u komunikacionoj mreži u užem smislu, a područja frekvencija u tom slučaju su 3 725,3 800 i 3 875 MHz za emitiranje, te 6 050,6 125 i 6 200 MHz za prijem.

Od prijenosa vršenih satelitima tipa MOLNIA I koji su prešli granice Sovjetskog Saveza, značajni su prenosi signala u boji, vršeni između Francuske i Sovjetskog Saveza u oba smjera, prvi put u prosincu 1965. Prema svim informacijama (11), (12), (13) sateliti iz sistema ORBITA riješili su na potpuno zadovoljavajući način i vrlo ekonomično specifične probleme distribucije programa u Sovjetskom Savezu, na ogromnim prostorima. Napomenimo da je u travnju 1970. i Kuba uključena u mrežu satelita MOLNIA.

O djelatnosti INTELSAT-a, organizacije koja još danas u svjetskim razmjerima, kako smo vidjeli gore, jedina iskorištava komercijalne komunikacione satelite i koja je osnovana 1964 upravo s tim ciljem, postoje dosta podijeljena mišljenja. Za vrijeme održavanja konferencije UN o istraživanjima i mirnom iskorištavanju izvan atmosferskih prostora* u Beču 1968, bilo je dosta opravdanih prigovora radu ovog konsorcija — dakako ne u čisto tehničkom smislu — a bila je lansirana i ideja o osnivanju jednog novog, pod imenom »Intersputnik«. Ne ulazeći u ocjenu razloga za neuspjeh te nove akcije kao ni u ocjenu o tome u kojoj bi mjeri trebalo »reformirati« INTELSAT (a da bi trebalo, to je sigurno), potrebno je naglasiti da su, zahvaljujući ovoj organizaciji, koja danas uključuje među svoje članove preko 70 nacija odnosno država, u stvari omogućene i ostvarene satelitske komunikacije u svjetskim razmjerima. Uz ono što smo ranije rekli o pojedinim lansiranim satelitima, navedimo ovdje da je INTELSAT odnosno COMSAT — u stvari tehnička agencija INTELSAT-a — započeo 1965. s pet zemaljskih stanica a da je taj broj u toku 1971 došao na 44 zemlje sa 61 stanicom odnosno 80 antenskih sistema: 14 stanica ima dva ili više antenskih sistema. To drugim riječima znači da u sistemu INTELSAT radi već sada u stvari 80 zemaljskih stanica, podijeljenih na satelite iznad Atlantika, Pacifika i Indijskog oceana.

S određenog aspekta usporedba aktivni-pasivni satelit može se izvršiti i objektivno: može se pokušati napraviti bilancu energetskih odnosa iz kojih se dade izvući niz određenih zaključaka. U literaturi nalazimo ovakve bilance napravljene na razne načine, s raznih stanovišta i često s određenim tendencijama. Račun koji slijedi poslužit će nam da pokušamo izvući samo objektivnu računsku bilancu koja omogućuje stvaranje određenih zaključaka i daje nedvojbeno elemente za daljnje spekulacije.



Slika 3.9

* UN Conference on the Exploration and Peaceful Uses of outer Space.

Imamo li posla s aktivnim satelitom, moći ćemo, držeći se oznaka na slici 3.9, postaviti slijedeće odnose:

Kad bi zemaljska stanica A isijavala izotropno snagu p_T odašiljača, bila bi na mjestu gdje se nalazi satelit s, u udaljenosti d_1, gustoća energije

$$S_0 = \frac{p_T}{4\pi d_1^2} \tag{3.2}$$

Vrši li se isijavanje preko antene s dobitkom g_T (prema izotropnom radiatoru), bit će gustoća

$$S = g_T \frac{p_T}{4\pi d_1^2} \tag{3.2a}$$

Ima li prijemna antena na satelitu efektivnu površinu A, bit će snaga koju će moći predati na ulaz u prijemnik

$$p'_R = A\,S \tag{3.3}$$

Između dobitka antene i efektivne površine postoji poznata relacija

$$A = g \frac{\lambda^2}{4\pi} \tag{3.4}$$

pa je onda

$$p'_R = g'_R \frac{\lambda^2}{4\pi} g_T \frac{p_R}{4\pi d,^2} = g'_R\, g_T\, p_T \left(\frac{\lambda}{4\pi d_1}\right)^2 \tag{3.3a}$$

Član u zagradi predstavlja gušenje u slobodnom prostoru, na trasi duljine d_1,

Kod aktivnog satelita možemo odnos između snage koju njegov odašiljač daje (na drugoj frekvenciji, dakako) i primljene snage (potrebne za korektan rad) nazvati dobitkom satelita i označiti ga sa g'. U tom slučaju, uz isto rezoniranje kao gore, uz udaljenost između satelita i zemaljske prijemne stanice B (zemaljske stanice u pravilu su i prijemne i odašiljačke) d_2, bit će snaga predana na ulaz prijemnika zemaljske stanice

$$p_R = p'_R\, g'\, g'_T\, g_R \left(\frac{\lambda_1}{4\pi d,}\right)^2 \tag{3.5}$$

$$= p_T\, g_T \frac{\lambda^2}{(4\pi d_1)^2}\, g'\, g'_R\, g'_T \frac{\lambda_1^2}{(4\pi d_2)^2}\, g_R \tag{3.5a}$$

Imamo li posla s pasivnim satelitom situacija će prema slici 3.9 biti slijedeća:

Odašiljač na Zemlji emitira opet p_T preko g_T, pa je gustoća na mjestu prijema, na kome se nalazi satelit, kao i prije

$$S = g_T \frac{p_T}{4\pi d_1^2} \tag{3.2a}$$

a ako je površina satelita A, on će primati i isijavati snagu

$$p' = A\,S = A g_T \frac{p_T}{4\pi d_1^2} \tag{3.6}$$

Na mjestu prijema, u udaljenosti d_2, bit će gustoća

$$S_R = A\,S \frac{1}{4\pi d_2^2} = A g_T \frac{p_T}{(4\pi)^2 d_1^2 d_2^2} \tag{3.7}$$

Ima li prijemna antena apsorpcionu površinu A_p, bit će primjena snaga na ulazu u prijemnik

$$p_R = A_p\, S_R \tag{3.8}$$

kako je

$$A_p = g_R \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

to je i

$$p_R = g_R \frac{\lambda^2}{4\pi} A\, g_T \frac{p_T}{(4\pi)^2 d_1^2 d_2^2} \tag{3.8a}$$

Ovaj izraz možemo lako pretvoriti u

$$p_R = p_T\, g_T \frac{\lambda^2}{(4\pi d_1)^2} \frac{4\pi A}{\lambda^2} \frac{\lambda}{(4\pi d_2)^2} g_R \tag{3.8b}$$

Kad bi λ i λ_1 bili jednaki, onda bi usporedba izraza (3.5a) i (3.8b) pokazala da će se s aktivnim i pasivnim satelitom na Zemlji, u prijemu, postići jednaki uvjeti ako je

$$g'\, g'_R\, g'_T = \frac{4\pi A}{\lambda^2} g_R \tag{3.9}$$

Kod pasivnog satelita, za danu frekvenciju. jedini faktor kojeg možemo mijenjati, da bi mogli mijenjati odnose između primljene i emitirane snage (p_R/p_T), je efektivna površina A. Za razliku od toga, imamo kod aktivnog satelita tri elementa: g', g'_R i g'_T. Činjenica da su tri gubi nešto na privlačivosti jer su sva tri ovisna o satelitu a osim toga redovno je g'_R vezano čvrsto na g'_T, jer se radi o istoj anteni. Zbog omnidirekcionalne karakteristike isijavanja pasivnog satelita, površine — kad bi ih uspoređivali — i njihovi dobici dali bi svakako prednost načinu iskorištavanja tih površina kakvog imamo kod aktivnih satelita.

Kakvi su stvarno odnosi aktivnih površina kod pasivnih reflektora vidimo iz tablice II (14), koja daje efektivne površine 100 kg aluminiuma oblikovane na razne načine, uz $\lambda = 0{,}1$ m:

TABLICA II

Tip	A (m^2)
sferna ljuska 17 m radiusa	925
100 sfernih ljuski radiusa 1,7 m	925
$2{,}5.10^6$ sfernih ljuski radiusa 1,1 cm	$6{,}6.10^{-2}$
3.10^8 sfernih ljuski radiusa 10^{-1} cm	$2{,}4.10^{-10}$
7.10^{13} kuglica promjera 10^{-3} cm	$1{,}9.10^{7}$
$9{,}4.10^9$ poluvalnih dipola promjera 10^{-3} cm	$8{,}5.10^{9}$
ravna okrugla ploča radiusa 34 m	925

Ne ulazeći u ocjenu točnosti navedenih brojeva, vidimo da se vrlo velika površina pridaje dvama oblicima reflektora: poluvalnim dipolima i ravnoj okrugloj ploči. Evidentno je da ravna okrugla ploča ovih dimenzija ima vrlo direktivno djelovanje, pa bi kao pasivni satelit mogla biti upotrebljena samo uz ozbiljne mjere stabilizacije što bi, dakako, kad bi i postojala mogućnost praktične realizacije, dovelo u pitanje »pasivnost« ovakovog satelita. Poluvalni dipoli nemaju tu manu ali su, posve sigurno, opterećeni manama koje je takvo rješenje pružalo u ranije spomenutom projektu WEST FORD. Zaključak autora da bi prema tome 1 kg aleatorno raspodijeljenih poluvalnih dipola, s refleksionom površinom $1{,}9.10^5$ m² sa $\lambda = 0{,}1$ m opravdao pretpostavku o jednakoj vrijednosti aktivnog i pasivnog satelita ako je ostvaren odnos

— izlazna snaga odašiljača na satelitu = 0,2 W/kg —

odnos koji slijedi iz jedne usporedbe za konkretan slučaj prilika kod obiju vrsta satelita, ne bi se bez daljnjega mogao prihvatiti zbog nejednakosti kvaliteta obaju rješenja.

Analiza koju je izvršio Hansen (15) manje je povoljna kao zaključak za pasivne satelite, iako je zaključak izveden iz pretpostavke koja je prihvatljiva, da je naime pasivni rele na visini od 3 704 km a aktivni da je stacionarni, dakle na visini od 35 871 km.

Neovisno o tome i o smjerovima u kojima se danas tehnika komunikacija putem satelita razvija, može se iz analiza napravljenih gore zaključiti posve općenito da će aktivni sateliti imati neospornu prednost na velikim visinama ili ako se hoće imati ekonomične zemaljske stanice. Aktivni sateliti naglašavaju mogućnost upotrebe malih snaga na Zemlji, velikih osjetljivosti prijemnika na satelitima i relativno veliku izlaznu snagu odašiljača satelita.

Pasivni sateliti, s druge strane, traže velike snage odašiljača na Zemlji (vidi primjere u kasnijim poglavljima) i prijemnike velike osjetljivosti da bi ostali u granicama mogućnosti realizacije, kao veličine.

LITERATURA

(1) *J. Voge:* Telecommunications internationales par satellites artificiels, OE, No 434, mai 1963, str. 489—502
(2) *E. Morov:* The West Ford Experiment, PIRE maj 1964, str. 461—468
(3) *I. Lebow et al.:* The West Ford Belt as a Communications Medium, PIRE maj 1964, str. 543—563
(4) CCIR doc IV/21, siječanj 1961
(5) ORTF: Les satellites de communication, interni dokument B/598
(6) *Fink:* Radar Engineering, Mc Graw Hill, 1947, str. 385 i dalje
(7) *Ridenour:* Radar System Engineering, Mc Graw Hill 1947, str. 67 i dalje
(8) *Hall:* Radar aids to navigation, Mc Graw Hill 1947, str. 325—327 i dalje
(9) *Brown, Senn:* Project SCORE, PIRE, april 1960, str. 624 i dalje
(10) Telecommunication journal, Vol 36. XII/1969, str. 722
(11) *Kantor, Borodič:* Sistem »Orbita« Doc A/conf 34/I 23, Beč lipanj 1968
(12) *Kaplanov:* Molnia I, Doc A/conf 34/I 25, Beč, lipanj 1968
(13) *Krivošeiev:* Le developpement de la television en URSS, Journal de telecommunications, Vol 35. XI 1968, str. 588—590
(14) *Bond et al.:* Interference and Channel Allocation Problems with Orbiting Satellite Communication Relay, PIRE april 1960, str. 608 do 612
(15) *Hansen:* Communication Satellites Using Arrays, PIRE, juni 1961, str. 1066 i dalje.

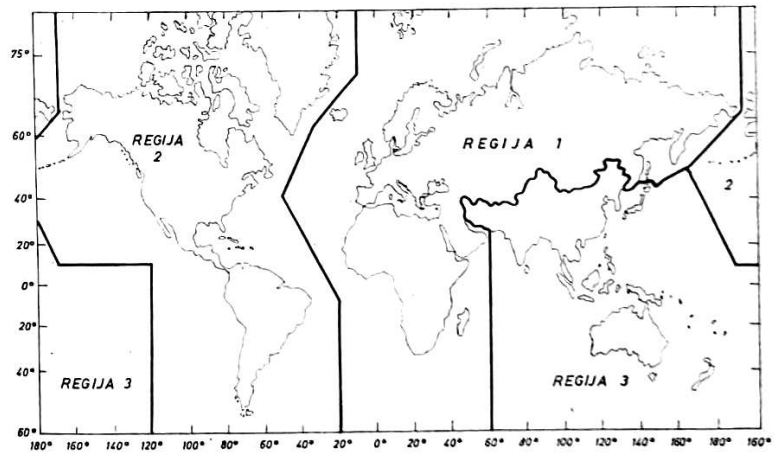
4.

Izbor frekvencija za spacialne komunikacije

Problem izbora frekvencija za spacialne komunikacije općenito, pa prema tome i za komunikacione satelite, ima dva aspekta: jedan je od njih, mogli bi reći administrativno-juridički a drugi fizikalno-tehnički, jer će na izbor frekvencija uvijek utjecati dva faktora, tj. težnja i potreba da se primjene frekvencije koje će uzrokovati najmanje smetnji drugim službama koje te frekvencije ili područja frekvencija upotrebljavaju, te težnja i potreba da se primjene frekvencije koje su fizikalno primjerene prirodi veze koja je u pitanju, neovisno o tome da li bi te frekvencije mogle iskorištavati i druge službe.

Prvi je satelit lansiran 1957 godine, a 1962 je TELSTAR pokazao da je putem satelita stvarno moguć prijenos multikanalnih telefonskih veza, odnosno televizijskog programa, ali je već 1959 postavljen problem određivanja pojaseva frekvencija koje bi bile rezervirane ili osigurane za spektar mogućih spacialnih komunikacija. Pomanjkanje iskustvenih elemenata bilo je razlogom da se je tek 1963 održala u Genevi Izvanredna administrativna konferencija za radiokomunikacije (CAER), a sredinom (7. VI do 17. VII) 1971 Svjetska administrativna konferencija za spacijalne komunikacije. U tablici dodjele

sl. 4.1



Slika 4.1

frekvencija, za regiju 1, (sl. 4.1) koju je ova konferencija izradila, imamo ono što je dodijeljeno za tipične satelitske službe navedeno u tablici I.

TABLICA I

Frekventno područje		Namjena
7 000— 7 100	kHz	Amaterske satelitske službe
14 000— 14 250	kHz	Amaterske satelitske službe
18 052— 18 068	kHz	Istraživanja u prostoru
21 000— 24 450	kHz	Amaterske satelitske službe
21 850— 21 870	kHz	Radioastronomija
28— 29,7	kHz	Amaterske satelitske službe
30,005— 30,010	MHz	Identifikacija satelita, istraživanja u prostoru
37,75 — 38,25	MHz	Radioastronomija
136—137	MHz	Istraživanja u prostoru
137—138	MHz	Telemetrija, meteorološki sateliti, istraživanja u prostoru
143,6 —143,65	MHz	Istraživanja u prostoru
144—146	MHz	Amaterske satelitske službe
149,9 —150,05	MHz	Radionavigacioni sateliti
150,05 —153	MHz	Radioastronomija
272—273	MHz	Telemetrija
399,9 —400,05	MHz	Radionavigacioni sateliti
400,05 —400,15	MHz	Standardne frekvencije (sateliti)
400,15 —401	MHz	Meteorološki sateliti, istraživanja u prostoru
401—403	MHz	Meteorološke satelitske službe
406—406,1	MHz	Mobilne satelitske službe
406,1 —410	MHz	Radioastronomija
460—470	MHz	Meteorološke satelitske službe
1427—1429	MHz	Telekomande
1525—1535	MHz	Telemjerenja, istraživanja bogatstva Zemlje
1535—1542,5	MHz	Pomorske mobilne sat. službe
1542,5 —1543,5	MHz	Areonautičke mobilne sat. službe Pomorske mobilne sat. službe
1543,5 —1558,5	MHz	Areonautičke mobilne sat. službe
1644—1645	MHz	Pomorske i aeronautičke sat. mobilne službe
1645—1660	MHz	Aeronautičke mobilne sat. službe
1660—1670	MHz	Meteorološke pomoćne službe Radioastronomija
1670—1690	MHz	Meteorološke satelitske službe
1690—1700	MHz	Meteorološke satelitske službe
1700—1710	MHz	Prostorna istraživanja
1770—1790	MHz	Meteorološke satelitske službe
2290—2300	MHz	Prostorna istraživanja
2500—2690	MHz	Radiodifuzni sateliti
2690—2700	MHz	Radioastronomija
3400—4200	MHz	Satelitske fiksne veze (Satelit — Zemlja)
4400—4700	MHz	Satelitske fiksne veze (Zemlja — Satelit)
4990—5000	MHz	Radioastronomija
5725—6425	MHz	Satelitske fiksne veze (Zemlja — Satelit)
7250—7750	MHz	Satelitske fiksne veze (Satelit — Zemlja)
7900—8400	MHz	Satelitske fiksne veze (Zemlja — Satelit)
8400—8500	MHz	Prostorna istraživanja
10,6 — 10,68	GHz	Radioastronomija

Frekventno područje		Namjena
10,68— 10,7	GHz	Radioastronomija
10,95— 11,2	GHz	Satelitske fiksne veze (Zemlja — Satelit) (Satelit — Zemlja)
11,45— 11,7	GHz	Satelitske fiksne veze (Satelit — Zemlja)
11,7 — 12,5	GHz	Radiodifuzni sateliti
12,5 — 12,75	GHz	Satelitske fiksne veze (Zemlja — Satelit) (Satelit — Zemlja)
14 — 14,5	GHz	Satelitske fiksne veze (Zemlja — Satelit)
17,7 — 21,2	GHz	Satelitske fiksne veze (Satelit — Zemlja)
21,2 — 22	GHz	Istraživanja bogatstva Zemlje
23,6 — 24	GHz	Radioastronomija
24 — 24,05	GHz	Amaterske satelitske službe
27,5 — 31	GHz	Satelitske fiksne veze (Zemlja — Satelit)
40 — 41	GHz	Satelitske fiksne veze (Satelit — Zemlja)
41 — 43	GHz	Radiodifuzni sateliti
43 — 48	GHz	Navigacioni sateliti
50 — 51	GHz	Satelitske fiksne veze (Zemlja — Satelit)
51 — 52	GHz	Istraživanja bogatstva Zemlje Prostorna istraživanja
52 — 54,25	GHz	Prostorna istraživanja
54,25— 58,2	GHz	Međusatelitske službe
58,2 — 59	GHz	Prostorna istraživanja
59 — 64	GHz	Međusatelitske službe
65 — 65	GHz	Prostorna istraživanja Istraživanja bogatstva Zemlje
65 — 66	GHz	Prostorna istraživanja
66 — 71	GHz	Navigacioni sateliti
84 — 86	GHz	Radiodifuzni sateliti
86 — 92	GHz	Radioastronomija, prostorna istraživanja
92 — 95	GHz	Satelitske fiksne veze (Zemlja — Satelit)
95 —101	GHz	Navigacioni sateliti
101 —102	GHz	Prostorna istraživanja
102 —105	GHz	Satelitske fiksne veze (Satelit — Zemlja)
105 —130	GHz	Međusatelitske službe
130 —140	GHz	Radioastronomija, svemirska istraživanja
140 —142	GHz	Satelitske fiksne veze (Zemlja — Satelit)
142 —150	GHz	Navigacioni sateliti
150 — 152	GHz	Satelitske fiksne veze (Satelit — Zemlja)
170 —182	GHz	Međusatelitske službe
182 —185	GHz	Prostorna istraživanja
185 —190	GHz	Međusatelitske službe
190 —200	GHz	Navigacioni sateliti
220 —230	GHz	Satelitske fiksne veze
230 —240	GHz	Radioastronomija, prostorna istraživanja
250 —265	GHz	Navigacioni sateliti
265 —275	GHz	Satelitske fiksne veze

Kod rada čiji su rezultati dani u gornjoj tablici, trebalo je voditi računa o nizu djelatnosti koje se odvijaju u svemiru i u vezi sa svemirskim tijelima

lansiranim sa Zemlje i onima koji su tu »starosjedioci«. Kako je već spomenuto, jedna od priznatih djelatnosti je i radioastronomija kojoj je i na konferenciji za radiokomunikacije 1959 bio dan status radioelektričke službe, a koja se, kao znanost, zasniva na prijemu radioelektričkih signala vanzemaljskog porijekla i njihove interpretacije. Ta djelatnost odnosi se, dakle, na prirodna svemirska tijela i na »komunikacije« u samo jednom smjeru.

Ostale djelatnosti skuplja CCIR u osnovne grupe:

— identifikacija satelita*
— daljinska mjerenja i praćenje
— telekomande
— svemirska istraživanja
— svemirska istraživanja dalekog prostora**
— daljinska mjerenja i praćenje kod svemirskih istraživanja
— radionavigacija putem satelita
— satelitska meteorologija
— pomoćne službe za satelitsku meteorologiju
— daljinska mjerenja i održavanje kod satelitske meteorologije
— telekomunikacije putem satelita (satelit-Zemlja)
— telekomunikacija putem satelita (Zemlja-satelit).

U ovoj raspodjeli obuhvaćene su službe koje imaju u izvjesnom smislu karakter komunikacija u užem značenju te riječi i frekventno područje od 10 MHz do 40 GHz. Nije, međutim, obuhvaćena služba radiodifuzije putem satelita ni u jednom od svojih oblika, koji su na Interimnom zasjedanju studijskih komisija X i XI CCIR-a u Palmi 1968 definirani kao (1):

— službe za indirektnu distribuciju
— službe za direktnu distribuciju
— službe za radiodifuziju putem satelita.

Materijal koji se odnosi na spacialne komunikacije općenito vodio je CCIR do 1970 godine*** u komisiji IV (te u komisijama X i XI, kad se on odnosi na radiodifuziju i televiziju putem satelita) u grupama:

— sateliti za telekomunikacije
— radiodifuzija sa satelita
— radionavigacija putem satelita
— meteorološki sateliti
— daljinska mjerenja za održavanje, praćenje i daljinsko upravljanje
— istraživanje svemira
— radioastronomija
— astronomija putem radiodetekcije.

(Nova raspodjela izmijenila je pripadnost materije studijskim komisijama u znatnoj mjeri: radioastronomija i svemirska istraživanja su sada posebna komisija II, a problematika radiodifuznih i televizijskih satelita tretira se u komisijama X odnosno XI; ostala materija pretežno fiksne komunikacione veze preko satelita ostala je u komisiji IV).

---

* I ovdje, kao i u daljnjem tekstu, misli se na umjetne satelite.

** Pod »dalekim prostorom« podrazumijevaju se prostori dalje od zemljinog Mjeseca. U N. Delhiju, na XII Plenarnom zasjedanju CCIR-a (siječanj—veljača 1970), spominju se i druge definicije kao prijedlozi.

*** Nova raspodjela napravljena je na XII Plenarnom zasjedanju u N. Delhiju u siječnju i veljači 1970.

Klasifikacija područja kao gore, koja se, napomenimo usput, sada prvi put proteže i na frekvencije iznad 40 GHz, ne govori o konkretnim frekvencijama za pojedine slučajeve i predstavlja samo raspodjelu na skupine djelatnosti, odnosno službi. Raspodjela iz tablice I obuhvaća zbog toga administrativnu sistematizaciju i područja koja nas ovdje ne zanimaju direktno. Ni za njih kao ni za ona, koja nas direktno zanimaju — komunikacije u užem smislu, koje se sada pojavljuju kao satelitske fiksne veze i satelitske radiodifuzne službe — nije u tablici naveden niz otvorenih pitanja koje je i posljednja Administrativna konferencija, nužno, ostavila otvorenim. Ona se dakako odnose na traženje koegzistencije i rješavanje problema koordinacije u situaciji, koja je sve teža zbog naglog razvoja satelitskih službi, i potrebe da neke službe na Zemlji i dalje ostanu.

Ograničimo li se na satelitske komunikacije u najužem smislu — na ono dakle što je u tablici I navedeno kao satelitske fiksne veze — vidimo da su za njih namjenski dodjeljena slijedeća područja:

a) za veze sateliti — Zemlja

3 400—4 200 MHz
5 725—6 450 MHz
7 250—7 750 MHz (7 250—7 300 MHz isključivo)
10,95— 11,2 GHz
11,45— 11,7 GHz
12,5—12,75 GHz (isključivo)
17,7— 21,2 GHz (19,7—21,2 GHz isključivo)
40,0— 41,0 GHz (isključivo)
102— 105 GHz (isključivo)
150— 152 GHz (isključivo)

b) za veze Zemlja — sateliti

4 400—4 700 MHz
5 725—6 425 MHz
7 900—8 400 MHz (7975—8025 MHz isključivo)
10,95— 11,2 GHz
12,5—12,75 GHz (isključivo)
14,0— 14,5 GHz
27,5— 31,0 GHz (29,5—31 GHz isključivo)
50— 51 GHz (isključivo)
92— 95 GHz (isključivo)
140— 142 GHz (isključivo)

c) nedefinirano

220— 230 GHz (isključivo)
265— 275 GHz (isključivo)

Osim onoga što je navedeno kao isključivo, ostalo je podijeljeno s drugim službama što evidentno znači ograničenje u izboru položaja i maksimalne isijane snage (EIRP) u smjeru horizonta, odnosno u smjeru stacionarne orbite, na uređajima za veze na Zemlji, jednako kao i ograničenja u dozvoljenoj gustoći toka snage (ili jakosti polja) na površini Zemlje od odašiljača na satelitu. (vidi pogl. 9.1.).

Slična je situacija i s područjima dodjeljenim za radiodifuziju preko satelita:

2 500—2 690 MHz
11,7— 12,5 GHz
41— 43 GHz (isključivo)
84— 86 GHz (isključivo)

Prvo je područje podijeljeno s fiksnim i mobilnim službama na Zemlji, a drugo s radiodifuzijom na Zemlji te fiksnim i mobilnim službama. Za njega je na konferenciji, uostalom, dan prijedlog za raspodjelu putem konferencije za planiranje u toku slijedećih godina. Područja 41—43 GHz i 84—86 GHz, za sada su isključiva.

Detaljna ispitivanja čiji su rezultati bili iscrpno razmatrani na gore spomenutom Interimnom zasjedanju studijskih grupa X i XI CCIR-a,* pokazala su nemogućnost emitiranja radiodifuznog odnosa televizijskog programa sa satelita u područjima koja su ranije raspodijeljena, iako se inače u svim računima, primjerima proračuna, pojavljuje područje 800 MHz koje je stvarno dodijeljeno televiziji. Ovo područje u mnogim dijelovima svijeta — a to vrijedi posebno za evropsku radiodifuznu zonu — postalo bi naime, uvođenjem satelitskih emisija, neupotrebljivo za obje službe — onu na Zemlji kao i onu sa satelita.** Prema predviđanjima koja dosadašnji razvoj opravdava, može se, naime, očekivati da će u toj zoni, u slijedećih 5 godina — dakle do 1975 — mnoge zemlje imati već razvijenu i drugu mrežu u području 582—960 MHz, dok će neke od njih kroz daljnjih 5 godina imati svoju treću mrežu, što će praktički značiti kompletno zaposjedanje, odnosno zasićenje ovog područja. Za kakvih 20 godina može se očekivati razgrađivanje mreže u I i III pojasu (41—68 MHz odnosno 174—230 MHz) u kojima je već danas situacija nemoguća zbog ogromnog broja odašiljača te činjenice da tu imamo TV-sisteme koji rade s 819, 625 i 405 linija, s kanalizacijom razmaka 5, 7, 8 i 14 MHz i međusobnim pomakom kanala kod iste kanalizacije te »tete beche« kanalima.

Ako se uzmu u obzir gore nabačeni problemi, vidi se da frekvencije za satelitske komunikacije treba birati sa stanovišta minimalne vjerojatnosti međusobnih smetnji. Optimalne frekvencije mogle bi se, međutim, birati i sa stanovišta odnosa signal/šum koji je raspoloživ za danu vrijednost emitirane snage te odnosa sa stanovišta efekta refrakcije i drugih faktora propagacije koji mogu kvariti karakteristike signala.

S fizikalnog stanovišta evidentno je da odabrane frekvencije moraju omogućiti vezu kroz zemaljsku atmosferu — troposferu i ionosferu — koja, prema tome, mora za te frekvencije biti transparentna. Poznato je, međutim, da zračni plašt oko Zemlje djeluje selektivno: neke frekvencije zadržava a neke propušta, jedanput iz jednog a drugi put iz drugog razloga. Uobičajeno je nazivati »prozorom« područje frekvencija za koje se prolaz kroz atmosferu vrši, više-manje, bez zapreka. Od frekvencija koje su danas u tehničkoj primjeni za prenos informacija širokog spektra, područje od 10 MHz do 30 GHz, ograničeno je s jedne strane frekvencijama za koje je kritično djelovanje ionosfere, a s druge onima kod kojih dolazi do izražaja utjecaj oborina i apsorpcija u plinovima. To područje smatra se upotrebljivim za telekomunikacije ove vrste

* Palma, svibanj 1968.

** Potrebno je napomenuti da sateliti tipa Molnia kako smo vidjeli, kad rade u mreži »Orbita« za distribuciju TV-programa, emitiraju u području 800 MHz a primaju u području 1 000 MHz. I u USA spominje se često 800 MHz kao područje za direktnu emisiju televizije sa satelita. To područje (kanal 69) trebalo bi biti oslobođeno za direktnu emisiju sa satelita (projekt VisTa, vidi (2), (3)).

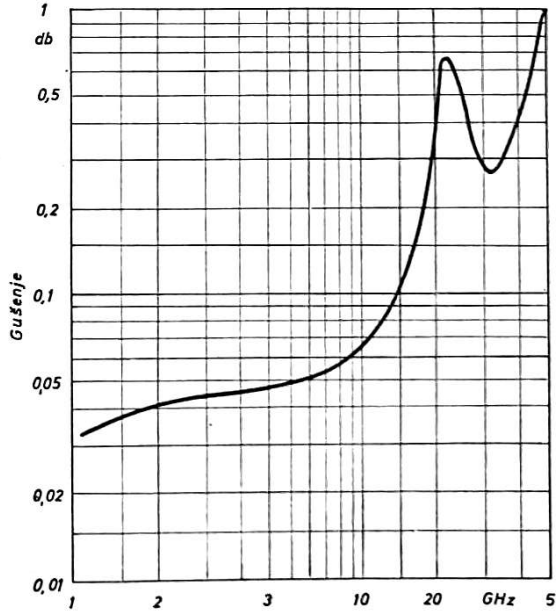
u užem smislu. Gornja granica može, u slučaju vrlo intenzivnih oborina, ići niže jednako kao što se i donja može popeti na 70 MHz, u ovisnosti o intenzitetu solarne aktivnosti, geografskom položaju izvora na Zemlji, te obliku putanje odnosno kutu upada. Atmosfera može, s druge strane, postati propusna i od 2 MHz u polarnim krajevima za vrijeme noći a »prozor« može biti otvoren i do 50 GHz, ako su uređaji postavljeni na vrlo visokim kotama i za vrijeme dok nema oborina.

Kad bi se radilo o propagaciji u prostoru kojeg nazivamo slobodnim prostorom, u prostoru — dakle — na koji medij u kome se propagacija vrši i okolina nemaju uticaja, te uz pretpostavku da odašiljačka i prijemna antena imaju dobitak: g_T i g_R, vrijedio bi za odnos emitirane (p_T) i primjene (p_R) snage poznati izraz:

$$\frac{p_R}{p_T} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 g_R\, g_T \qquad (4.1)$$

Stvarni uvjeti propagacije, u danom prostoru, koji nije u gornjem smislu slobodni prostor, neće odgovarati onima u slobodnom prostoru, pogotovo ne u blizini rubova »prozora«. Za dobivanje prave slike potrebno je uzeti u obzir djelovanje medija u kome se i kod telekomunikacija putem satelita, barem u jednom dijelu, vrši propagacija, potrebno je dakle uzeti u račun djelovanje atmosfere u svim njezinim slojevima.

Troposfera će i za lijepog vremena mijenjati odnose dane u (4.1) dodatnim gušenjem uzrokovanim u prvom redu plinovima, vodenom parom i oborinama. Povećanje gušenja bit će primjetljivo posebice kod viših frekvencija. Za propagaciju u smjeru zenita, uz prozirnu atmosferu, s karakteristi-



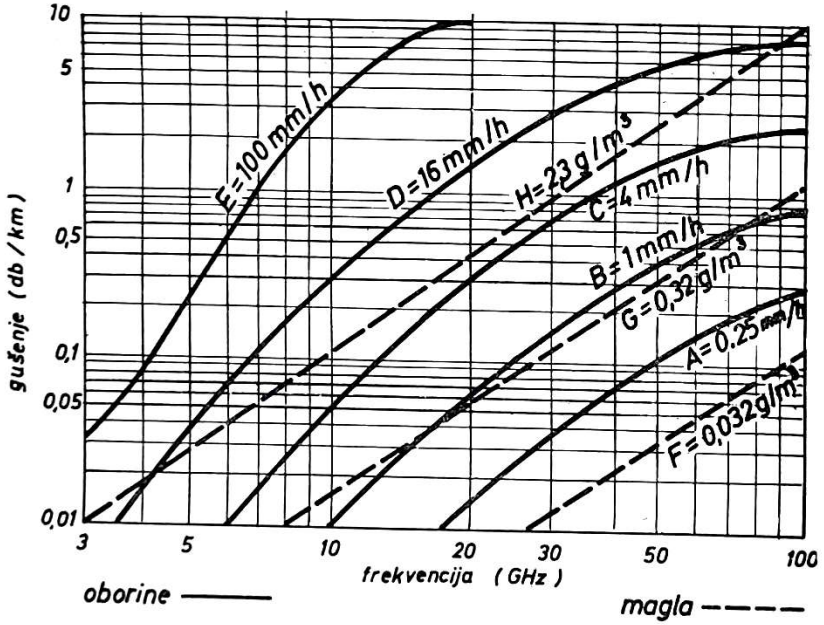
Slika 4.2

kama »normalne« atmosfere* prikazano je to dodatno gušenje na slici 4.2. kao funkcija frekvencije. Korekcioni faktor, neovisan o frekvenciji, za kuteve elevacije različite od 90° dan je u tablici II (4):

TABLICA II

kut prema horizontu (°)	5	7,5	10	30	90
faktor s kojim treba množiti gušenje u db dano na slici 4.2:	11	7,5	5,5	2,0	1,0

Kako utiču kiša, magla i oblaci na kilometar duljine trajekta, za tipsku raspodjelu veličine kapljica kiše i stalan intenzitet, vidimo na slici 4.3 (5). Kod jednakog intenziteta kiše, u ovisnosti o raspodjeli veličine kapljica i turbulenciji mijenjat će se i vrijednosti iz krivulja. Potrebno je napomenuti da već kiša od 16 mm/h odgovara jakoj kiši koja je u našim krajevima rijetka, nastaje s olujama pa je i relativno kratkotrajna a iz istog razloga i prostorno ograničena. Kad se posebice radi o radiodifuznoj primjeni satelita i radu na višim frekvencijama, onda je situacija čak i kod prelaza praga osjetljivosti, pri nevremenu, prihvatljiva zbog rijetkosti i kratkotrajnosti. Uostalom, i na nižim geografskim širinama, gdje su jake kiše dulje i češće kut elevacije antene je veći, pa je prema tome i prenosni put kroz gustu kišu kraći. Na širinama iznad naše kut je, doduše, manji ali su i guste, dugotrajne kiše još rjeđe nego u našim širinama.



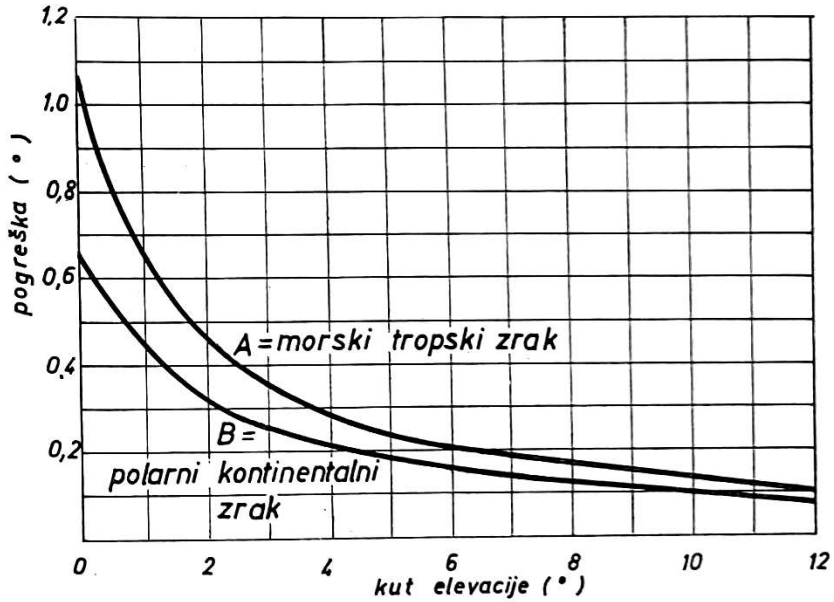
Slika 4.3

* Temperatura na površini Zemlje 290° K s linearnim padom na 223° K kod 10 km i konstantna dalje, barometarski tlak na površini Zemlje 760 mm s eksponencijalnim padom s visinom, apsolutna vlažnost 10 g/m³ na površini Zemlje s linearnim padom na 0 g/m³ na 5 km.

Procjene vršene za 6 GHz pokazuju da bi dodatno gušenje zbog kiše i oblaka moglo prelaziti 6 db za 0,1% vremena a 36 db za 0,01% vremena (procjene rađene za New Jersey USA). Slične procjene (za južnu Englesku), rađene na statističkim podacima o magli i kiši, pokazuju da bi dodatno gušenje uzrokovano kišom moglo preći 0,5 db a ono uzrokovano maglom 0,7 db za 1% vremena.

Do degradacije uvjeta prijema pojavom oborina može doći i usljed njihovog direktnog djelovanja na prijemne antene (vidi poglavlje 6).

Na donjoj granici »prozora« doći će apsorpcija u slojevima D, E i F sve više do izražaja kako frekvencija bude padala. Za najveći dio točaka na Zemlji bit će čak ispod 20 MHz dodatno gušenje rijetko iznad 1 db za vertikalnu incidenciju, a rijetko iznad 6 db za malene upadne kuteve. Donji slojevi atmosfere utjecat će na još jedan način, uzrokujući devijaciju smjera gibanja valova u ovisnosti o upadnom kutu i debljini sloja koji je na putu. Devijacija je u maloj mjeri ovisna o frekvenciji. Na slici 4.4 dane su pogreške kuta elevacije uzrokovane refrakcijom u donjim slojevima atmosfere (5). Za kuteve iznad 5°, a to su uopće interesantni kutevi za naše područje razmatranja, pogreške su reda 0,2°, dakle neznatne za niz primjena.



Slika 4.4

U vezi s izborom frekvencije u okviru »prozora« bit će od bitnog interesa poznavanje promjena radioelektričkih šumova u ovisnosti od položaja frekvencija u tom prozoru. Kao što je rečeno, šumovi će biti uzrokovani isijavanjem iz prirodnih izvora sa Zemlje i izvan Zemlje, industrijskim izvorima smetnji i isijavanjima iz atmosfere koja, kao apsorpcioni medij, okružuje Zemlju. Oni mogu biti primljeni preko glavne latice, iz dijagrama isijavanja antene, dakle iz »korisnog« smjera, jednako kao i preko sporednih latica iz istog dijagrama. Kao što ćemo vidjeti, šumovi ove vrste izražavaju se često

ekvivaletnom temperaturom. Kozmički šumovi prevladavaju u donjem dijelu prozora a s rastućom frekvencijom dolaze sve više do izražaja šumovi uzrokovani apsorpcijom u vodenoj pari i kisiku iz atmosfere.

Kozmički šum ima tri izvora: takozvani osnovni šum (glavni izvor galaksija), isijavanje iz lokaliziranih svemirskih radio-izvora i šum koji dolazi od naše najbliže zvijezde — Sunca. Prvi izvor gubi na utjecaju s rastućom frekvencijom i zanemariv je prema šumu prijemnika za frekvencije iznad cca 1 GHz. Postoji, međutim, jedna izotropna komponenta s temperaturom 3,5° K neovisna o frekvenciji. Radiozvijezde imaju vrlo malene kružne dimenzije i nisu često u »vidnom polju« antene na Zemlji. Sunce se normalno pojavljuje također pod malenim kutem i rijetko je u smjeru prijemne antene (vidi poglavlje 6). Njegova prividna temperatura šuma može, međutim, biti vrlo visoka a šum može poticati i iz prijema u bočnim laticama i to u znatnom iznosu. Temperatura šuma Sunca ovisit će, dalje, i o periodu sunčeve aktivnosti. Slika 6.5 (poglavlje 6) pokazuje tipične uvjete u ljetu, ovisnost promjena prividne temperature šuma neba, uzrokovane kozmičkim osnovnim šumom i atmosferskom apsorpcijom o kutu elevacije a za područja frekvencija od 100 MHz do 50 GHz.

Kao što smo i uvodno spomenuli, neovisno o fizikalnim uvjetima koji bi mogli utjecati na izbor frekvencija — a o nekima će biti ponovno govora u drugim kombinacijama — bit će s praktičkog stanovišta bitno tražiti mjesto u širokoj raspodjeli frekvencija koja je, kako je spomenuto, izvršena u svjetskim razmjerima. Za problematiku koja nas uže zanima, postavlja se kao pitanje traženje frekvencija u području 11,7 do 12,5 GHz koje još nije raspodijeljeno za satelite a, dakako, i u području 4 GHz i 6 GHz, i ostalima iz Tablice I.

Za satelitsku televiziju odnosno radiodifuziju bilo bi možda korisno navesti još nekoliko refleksija: Evidentno je da su za nju sve frekvencije u prozoru od 0,5 MHz do 15 GHz povoljne. Postojeći pojasevi I, III te IV i V (47—68 MHz, 174—230 MHz i 470—860 MHz) posebno su interesantni sa stanovišta prijemnika koji već postoje i za koje bi eventualno trebalo riješiti samo pitanje antena i — možda — pojačala. Neovisno o zauzetosti tih područja, za pojas I i III možemo konstatirati ozbiljno opterećenje kozmičkim šumom a to znači da bi i u slučaju neke posve nove perspektivne organizacije ta područja, za satelitsku televiziju, bila manje pogodna. U tom smislu situacija je nešto bolja u pojasevima IV i V ali su, kako je spomenuto, izgledi maleni zbog vrlo guste mreže odašiljača u tom području na Zemlji. Ostaje, dakle, područje 12 GHz: kozmički šum ne igra ovdje nikakvu ulogu dok atmosferska apsorpcija, koja iznad 6 GHz počima dosta brzo rasti, ali je i kod malenih kuteva elevacije njezin utjecaj još zanemariv u usporedbi sa šumom prijemnika. Gušenje od kiše ne prelazi pod kutem elevacije od 20° i vrlo jake kiše vrijednost od 4 db. To je i razlog da će se kod računa za ovo područje, uz primjenu frekventne modulacije, ulaziti s rezervom od cca 5 db iznad praga za FM prijem.

Napomenuti moramo da je i ovo područje već pod oštrim napadom sa strane radiodifuznih službi na Zemlji. Pomanjkanje kanala za televiziju u raspodijeljenim područjima privlači pažnju i na ovo područje pa je u toku čitav niz ispitivanja praktičke mogućnosti primjene frekvencija u pojasu 12 GHz za televiziju na Zemlji. Redovna Administrativna konferencija za radio-saobraćaj 1959. uvrstila je, uostalom, područje 11,7 do 12,7 GHz kao

područje za radiodifuziju podijeljeno sa stalnim i pokretnim službama (7), a to je i posljednja iz 1971, kako smo napomenuli, prihvatila u granicama 11,7 do 12,5 GHz.

LITERATURA

(1) CCIR Doc X/112 od 7. V 1968.
(2) *Marten, Gubin:* System Dosigne of a proposed Direct to Home TV Satellite Experiment, RCA Engineer Vol 12, No 2, august—septembar 1966, str. 74—79.
(3) *Kiesling:* Spaceborne transmitter for direct color television transmission from satellite, JEE Transactions, maj 1966, No 2, str. 73—78.
(4) CCIR Conclusions de la rennion Interimaire de la Commission d'etudes IV, str. 71, str. 58.
(5) CCIR Documents de la XI° Assemblée pleniere Oslo 1966.
(6) Zaključna dokumenta Izvanredne Administrativne konferencije za radio-saobraćaj Geneve 1963. Izdanje Saveznog Sekretarijata za saobraćaj i veze, Beograd 1964.
(7) Službeni list FNRJ br. 6, 27. V 1961. str. 36.

5.

Stabilizacija i praćenje satelita

U odnosu satelit-Zemlja odnosno Zemlja-satelit postoje, u principu, dvije osnovne grupe problema: oni koji se odnose na geostacionarne satelite i oni koji se odnose općenito na ostale — sa stanovišta orbite — vrste satelita.

Geostacionarni sateliti po definiciji su sateliti koji rotiraju oko Zemlje u istom smjeru kao i ona, u ekvatorijalnoj ravnini, kutnom brzinom koja je jednaka kutnoj brzini okretanja Zemlje. Ovakva definicija određuje i međusobne odnose: za svaku točku na Zemlji s koje se satelit vidi, odnosi postavljeni jedanput bili bi trajni odnosi. Ovo bi posebice vrijedilo i za međusobna usmjeravanja odgovarajućih antena.

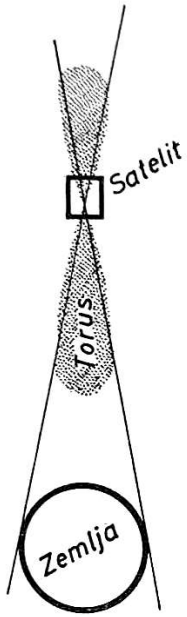
Geostacionarnost, uzeta strogo kao gore, samo je teoretska: odstupanja od idealnog položaja, makar i u relativno maloj mjeri, postojat će kao posljedica utjecaja niza faktora s intenzitetom promjenljivim u vremenu. Neznatne nejednakosti gravitacionog polja Zemlje, sile privlačenja Sunca i Mjeseca bit će, na primjer, razlozi »klizanja« satelita po orbiti i iz orbite. Klizanje po orbiti bit će tako posljedica činjenice da ekvator nije idealna kružnica pa ni gravitaciono polje Zemlje ne djeluje direktno prema centru Zemlje. Klizanje iz orbite bit će uzrokovano, s druge strane, djelovanjem Sunca i Mjeseca. Snage koje nastoje izmijeniti ravnotežje postignuto nakon što je satelit nizom operacija doveden u stacionarni položaj, vrlo su malene pa su i posljedice njihovog djelovanja malene ali ne i zanemarive, posebice kod nekih kategorija komunikacionih satelita. Zbog toga potrebno je poduzeti izvjesne mjere za »stabilizaciju« satelita.

Kao što smo već gore spomenuli, bit će kod aktivnih komunikacionih satelita od prvorazrednog interesa pitanje u kojem će — privilegiranom — smjeru biti isijavana energija. Radijatori — posrednici kod ovog procesa — mogu imati, kod satelita, tri osnovne karakteristike isijavanja:

— karakteristiku izotropnog radijatora, dakle isijavanje u jednakoj mjeri u svim smjerovima; evidentno je da kod ovakve karakteristike veći dio energije biva izgubljen za vezu satelit-Zemlja. Napomenimo da su prvi američki komunikacioni sateliti radili s tipom radijatora koji je imao ovakvu karakteristiku, kao i to, da je kod satelita s ovakvim radijatorom problem stabilizacije očito najmanje izražen;

— karakteristiku koja ima prostorno oblik toroida s presjekom ravninom okomitom na ravninu ekvatora kao na slici 5.1. Amerikanci nazivaju ovakvu karakteristiku »pancake-diagram«. Sistem s ovakvim karakteristikama isija-

vanja ima, prema izotropnom radijatoru, određen dobitak a isijavanje je najjače u ekvatorijalnom pojasu torusa. Komunikacioni sateliti tipa SYNCOM imali su ovakvu karakteristiku radijacionog sistema. Suvišno je napominjati da će se u slučaju primjene radijatora ovog tipa, posebice ako je snop vrlo uzak (kut δ malen), morati poduzeti mjere za stabilizaciju, u prvom redu s ciljem održavanja stalnog odnosa prema ravnini ekvatora;



Slika 5.1

— karakteristiku kod koje je glavnina isijane energije koncentrirana unutar konusa s užim ili širim otvorom i vrhom konusa u samom radijatoru. Presjek konusa okomit na os, može imati oblik kružnice ili elipse ili neki specijalni oblik. Maksimum snage isijavanja, bez poduzimanja posebnih mjera (vidi pogl. 6, »Antene za satelitske veze«) bit će u osi konusa.

Jasno je iz gornjeg da će u slučaju primjene radijatora s karakteristikama posljednjih dvaju tipova biti potrebno nastojati da energija koju satelit isijava u smjeru Zemlje, u prvom redu, a i ona koju zemaljska stanica isijava u smjeru satelita, bude koncentrirana na određene sektore na Zemlji odnosno u prostoru. Zbog toga mora položaj satelita u Svemiru biti stabiliziran tako da odnosi antena Zemlja-satelit, odnosno satelit-Zemlja, budu optimalni, tj. da maksimum energije bude upućen na centre tih sektora na Zemlji odnosno u prostoru.

Problematika stabilizacije satelita veliko je područje samo za sebe, pa je razumljivo da se možemo osvrnuti samo na neke osnovne elemente stabilizacije (1), (2), (3), (4), (6). Ona se može svesti na dva osnovna principa: pasivnu i aktivnu stabilizaciju — na stabilizaciju, dakle, kod koje, u osnovi nije potreban potrošak energije koja bi se morala uzimati iz izvora u samom satelitu i onu kod koje je, u principu, potrebno stalno — povremeno — trošenje energije iz izvora na samom satelitu.

Najjednostavnija pasivna stabilizacija satelita je tzv. »spin« — stabilizacija ili stabilizacija žiroskopskom rotacijom čitavog satelita oko osi okomite na ravninu orbite. Ova metoda, posebno jednostavna i efikasna, primjenjena je kod niza meteoroloških i istraživačkih satelita a posebice i kod serije SYNCOM.* Satelit pri tom rotira sa 100 do 150 okretaja na minutu. U pravilan položaj u odnosu na ravninu orbite dovodi se os rotacije (ili spin os) pomoćnim sapnicama ili zemaljskim magnetskim poljem. Kako su jedini mogući razlozi opadanja broja okretaja satelita, kad već jednom rotiraju, Foucaultove struje i magnetska histereza, vrlo slabi, nema potrebe — kroz dugi period vremena — podržavanja rotacije naknadnim intervencijama. Ako je orbita satelita polarna ili ekvatorijalna ostaje žiroskopska os okomita na ravninu orbite. Ako je orbita nagnuta na ravninu ekvatora, ima orbitalna ravnina precesiju pa su potrebne povremene korekcije žiroskopske osi. Potrebno je isto tako korigirati i nutaciju (periodska promjena smjera) žiroskopske osi oko njezinog srednjeg položaja. Kod »EARLY BIRDA« je ovo, na primjer, riješeno pasivnim amortizerom — staklenom cijevi, djelomično napunjenom živom i postavljenom paralelno sa osi. Gibanje žive u cijevi disipira energiju osciliranja sistema (5). Napomenimo usput da se ovim sistemom stabilizacije postizava i znatno olakšanje rješavanja problema regulacije temperature zahvaljujući periodskom eksponiranju čitave vanjske plohe satelita Suncu.

Drugi pasivni sistem stabilizacije je onaj koji primjenjuje silu teže Zemlje odnosno gradijent gravitacije. Ni kod ovog sistema, nakon što je satelit doveden u položaj, solarne baterije razvijene itd., nikakav elektronski aparat ne stavlja se u pogon za stabilizaciju a isto tako se ne troši energija iz samog satelita.

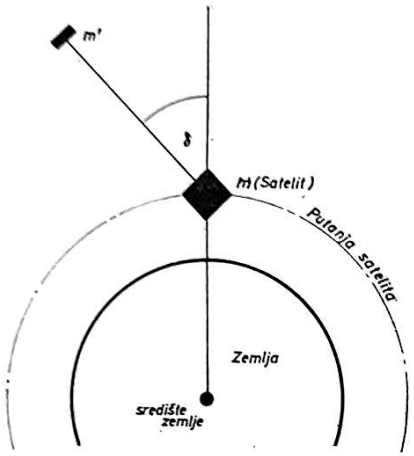
Princip rada ovog sistema vidi se na slici 5.2. Sila gravitacije Zemlje opada s kvadratom udaljenosti od Zemlje. Ako su dvije mase koje kruže oko Zemlje međusobno čvrsto vezane u kruti sistem, postojat će tendencija da se postave tako, da spojnica bude usmjerena prema centru gravitacije. Na slici je shematski prikazana tipična konfiguracija jednog, na ovaj način, pasivno stabiliziranog satelita. Sa m označena masa predstavlja satelit u užem smislu. Ona je čvrstim štapom vezana na malenu masu m'. Zbog razlike u djelovanju sile gravitacije nastaje zakretni momenat koji ima tendenciju da smanji kut δ, dakle da dovede štap u smjer prema centru Zemlje. Činjenica da se masa m' giba po luku s nešto većim radiusom djeluje u istom smjeru, smanjujući kut δ.

Matematska obrada ovog problema pokazuje da su zakretni momenti za malene kuteve proporcionalni kutevima a pri tome je moment usmjeravanja linearna funkcija razlike glavnih momenata tromosti i kvadratična funkcija kružne frekvencije obilaska satelita oko Zemlje. Moment usmjeravanja raste dakle s rastućom razlikom glavnih momenata tromosti ali pada ubrzano s rastućim radiusom putanje satelita. Iz ovog i dvije direktne konsekvencije:

1. Vanjska masa, označena na slici 5.2 sa m', postavlja se u udaljenosti od nekoliko metara do par desetina metara. Kako se ovakve udaljenosti ne bi dale realizirati krutim štapovima, pri lansiranju satelita, primjenjuju se štapovi koji tek po dolasku u orbitu satelita izlaze iz njega. Američki sateliti stabilizirani na ovaj način primjenjuju vrpce iz berilijeve bronze koja, namo-

* Sjetimo se da je karakteristika isijavanja radijacionog sistema kod ovog satelita toroidalna.

tana na bubanj, postaje cjevasti štap kad se razvije (vidi poglavlje 7.1 — Napajanje električnom energijom).



Slika 5.2

Činjenica da su momenti usmjerenja maleni, imat će neke posljedice:

— satelit podvrgnut samo paru sila oscilirat će trajno s periodom reda veličine trajanja ophodnje satelita. Za dobijanje potrebnog usmjerenja prema Zemlji, bez oscilacija, potrebni su sistemi prigušenja koji mogu biti bazirani na primjeni Foucaultovih struja ili magnetske histereze.

— na ovako malen momenat utjecat će, dalje, eksentricitet orbite, tlak sunčevih radiacija, preostali magnetizam pod djelovanjem magnetizma Zemlje, spljoštenost Zemlje, deformacija štapova za stabilizaciju uslijed zagrijavanja sunčevom toplinom.

Usprkos privlačivosti zbog jednostavnosti, ovaj sistem stabilizacije dosta je, prema tome, kompliciran u realizaciji. Neovisno o tome ističe se — ako je dobro izveden — u definitivi vrlo visokom pouzdanošću i pomanjkanjem potrebe za intervencijom. Velik niz satelita u USA, posebice onih vojnih, stabiliziran je na ovaj način.

2. Kao druga konsekvencija padanja momenta usmjeravanja s rastućim radiusom orbite, navodi se ograničenost ovog sistema stabilizacije na satelite s orbitama malene udaljenosti od Zemlje. Sistemi su u USA ispitani na orbitama do 500 km visine. Dovršavanje sistema za orbite visine do 10 000 km u programu su NASA-e.

Čitav niz aktivnih načina stabilizacije ispitan je već s uspjehom. Svi se oni dadu svesti na primjenu sistema sapnica, zamašnjaka ili drugih izvora zakretnog momenta koji omogućuju zadržavanje u pravilnom položaju jedne od triju osi satelita.

Evidentno je da će aktivni sistem stabilizacije, zbog niza komponenata kao što su senzori koji imaju kao referenciju Zemlju ili Sunce, izvori zakretnog momenta, regulacioni krugovi koji dojavljuju kontrolnom centru na Zemlji odstupanja, primaju od njega komande i djeluju na elemente za vršenje korekcije, biti suočen s nizom problema koje treba savladati ako se želi postići potrebna pouzdanost i trajnost. Za obranu aktivnog sistema može se,

međutim, navesti, da je on jedini u stanju osigurati smjerove s točnošću dijela stupnja, što je s pasivnim sistemima nemoguće. Aktivni sistem nije vezan ni na visinu, pa se može primijeniti i na satelite u sinhronim orbitama. Zbog obaju posljednjih svojstava ovaj sistem stabilizacije naći će primjenu posebice kod velikih satelita kakvi bi trebali biti sateliti za direktno emitiranje radio-programa i programa televizije. Ovdje će, recimo usput, naći vjerojatnu primjenu za stabilizaciju odnosno korekciju i ionski »motori«, koji se odlikuju vanredno malenim potroškom »goriva«.

Neovisno o primjedbama, nabačenim usput, koje se odnose na stabilizaciju kod satelita koji nisu stacionarni, evidentno je da je problem stabilizacije iznesen gore tipičan za geostacionarne satelite: antenski sistem na Zemlji u principu je stalno usmjeren prema satelitu na kojeg je vezan. Kod čitave grupe satelita koji nisu geostacionarni, pojavljuju se dva problema: konstantno usmjeravanje antenskog sistema zemaljske stanice prema odgovarajućem satelitu — praćenje satelita — a onda i stabilizacija samog satelita potrebna za održavanje »voznog reda« na korektnoj orbiti po kojoj se satelit giba.

Konstruktori zemaljskih stanica željeli bi, dakako, ako se već ne radi o geostacionarnim satelitima, imati posla sa satelitima koje će, prema određenom programu, biti lako pratiti. Komandni i kontrolni centri žele imati dovoljno dugi vremenski raspon između dviju sukcesivnih intervencija, raspon koji bi omogućio dovoljno precizno određivanje položaja i elemenata za korekciju. Ako su, s druge strane, tolerancije za poziciju satelita preuske, bit će frekventnost intervencije kontrolnog sistema znatno povišena, jer će trebati predusresti i kratkotrajne periodske perturbacije izazvane Suncem i Mjesecom.

Za satelita tipa INTELSAT III ili, na primjer, planirani Eurovizijski satelit, smatra se da je intervencija jednom u mjesecu, u cilju korekcije položaja satelita razumno rješenje (7). To znači da se dozvoljava nastupanje inklinacije od maksimalno 0,035° i klizanje u duljini u iznosu od $\pm$ 0,04° mjesečno. Ako antena zemaljske stanice ima otvor od 9,15 m (30 stopa) bit će kod 6 GHz širina snopa 0,38° pa onda automatsko praćenje ne bi bilo potrebno. Normalno će antena biti uperena prema satelitu, a tek po potrebi moći će se micati u ograničenom iznosu u azimutu i elevaciji. Kutna preciznost usmjerenja antene satelita, koja mora gledati u točno određenom smjeru, ako se želi osigurati pokrivanje određene površine, bit će funkcija otvora na pol snage antene satelita. Očito je da će uski snop tražiti veću preciznost od širokog. Smatra se da je postizavanje preciznosti usmjerenja jednako $^1/_{10}$ otvora snopa antene zadovoljavajuće. U (8) se daju kao vrijednosti za točnost usmjerenja od 1,5°, 0,3°, ili 0,05° već prema tome da li je širina snopa satelitske antene 17,5°, 3,5° ili 0,385°, što uz današnje mogućnosti ne predstavlja problem.

Što se samog praćenja u širem smislu tiče, ono je u principu potrebno za sve tipove satelita osim stacionarnih. Za specijalne slučajeve, radiodifuzne odnosno televizijske satelite, imamo u (8), kao primjer, upotrebu fiksnih antena i u slučaju kad se radi o nestacionarnim odnosno podsinhronim satelitima (Tablica I). Širina snopa antene ovdje je ona koja eliminira potrebe praćenja u označenim slučajevima.

Traženje i praćenje može biti uzrokovano i razlozima koji nisu na strani satelita. Za rad u mreži INTELSAT nije, na primjer, dozvoljeno da se snaga koju zemaljska stanica isijava mijenja za više od 0,5 db. To, međutim, znači

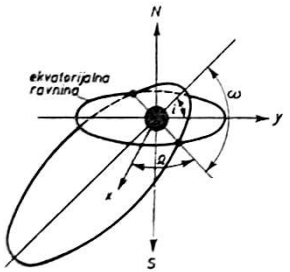
da će osim vrlo pažljive aktivne kontrole snage samog odašiljača i kontrole položaja satelita, biti potrebno imati aktivnu kontrolu preciznosti usmjerenja antene zemaljske stanice, koja se može pokazati potrebna kao posljedica uticaja vremenskih prilika — jednostavnim zagrijavanjem sunčevom toplinom, vjetrom i udarcima vjetra. Kod antena s vrlo velikim dobitkom — kod otvora na pol snage 0,12° — što je slučaj s novom antenom u Raistingu kod 6 GHz, pokazuje se za ispunjenje gornjih uvjeta potreba točnosti praćenja odnosno navođenja od nekoliko stotinki stupnja (9).

TABLICA I

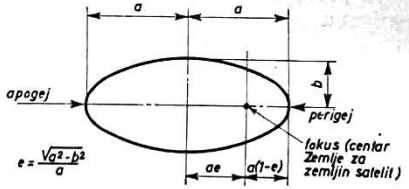
namjena frekvencija u MHz	FM radio 100	TV 70	TV 650	TV 11 800
otvor antena na pol snage u°	110	110	28	1,9
dobitak antena u db	6	6	15,2	38,8
tip antene za stacionarnu orbitu	fiks	fiks	fiks	fiks
isto za podsinhronu ekvatorijalnu cirkularnu orbitu	fiks*	fiks*	praćenje	praćenje
isto za eliptičku orbitu s nagibom 63°	fiks*	fiks*	fiks*	praćenje

* Za dijelove putanje koji su vidljivi prema tablici I u poglavlju 2.2.

Problem praćenja načelno je složeniji ako se radi o praćenju satelita na eliptičkoj putanji. Zbog uskog snopa mora zemaljska stanica neprestano pratiti i čekati satelit a to znači da mora stalno raspolagati s podacima potrebnim za praćenje, koje joj daje elektronski kalkulator. Za davanje podataka mora ovaj raspolagati sa 6 elemenata satelitske putanje. On mora poznavati (sl. 5.3 i 5.4):

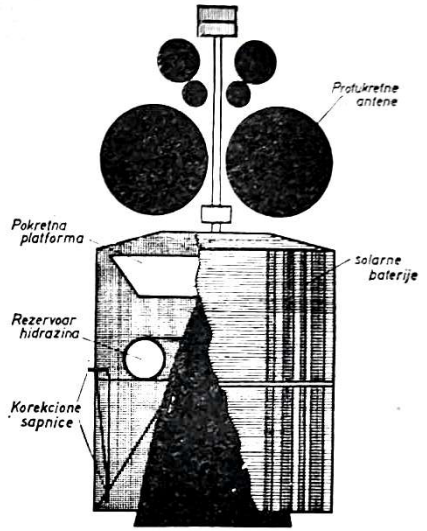


Slika 5.3



Slika 5.4

— veliku os eliptičke putanje
— numeričku vrijednost ekscentriciteta
— inklinaciju ravnine putanje (i)
— kut između osi x inercialnog sistema* i presjecišta ravnine putanje s ekvatorijalnom ravninom (Ω)
— kut perigeja (ω)
— mjesto na kojem se satelit na svojoj putanji u određenom momentu nalazi (na primjer moment prolaza kroz perigej).



Slika 5.5

Navodimo još, jer se radi o najnovijoj generaciji komunikacionih satelita (u užem smislu), kako je stabilizacija izvedena kod satelita tipa INTELSAT IV. On ima žiroskopsku stabilizaciju pri čemu cilindrički dio satelita rotira sa 60 okretaja na minutu. Evidentno je da je u ovom slučaju, jer INTELSAT IV radi s nekoliko usmjerenih sistema, bilo potrebno riješiti problem zadržavanja antena u smjeru i prenos energije antenama, koje relativno miruju, iz uređaja koji se nalaze u cilindru koji rotira. Ovaj satelit ima, dalje, i sredstva za orijentiranje odnosno držanje satelita u položaju. Tu su u prvom redu senzori za Zemlju i Sunce koji šalju podatke na Zemlju odakle dolaze neposredno komande za korekciju. Komande akcioniraju malene mlazeve s hidrazinom kao propulzivnim sredstvom. Jedna mlaznica montirana je radialno na periferiji cilindra, a druga je postavljena longitudinalno i služi za korekciju držanja u ravnini (vidi sl. 5.5). Satelit daje konačno i potrebne informacije za praćenje odnosno navođenje antenskog sistema na Zemlji kad se radi o automatskom a ne programiranom praćenju, a automatsko je praćenje potrebno u slučaju vrlo finih promjena kao što mogu biti već spomenute promjene uvjetovane vremenskim prilikama na zemaljskoj stanici.

* Koordinatni astronomski sistem koji nije podvrgnut okretanju niti akceleraciji.

(1) *Slack, Sandberg:* Tracking und Display of Earth Satellites, PIRE, april 1960. str. 655 i dalje.

(2) *W. Göschel:* Logestabilisierverfahren von Nachrichten Sateliten, Nachrichtentechnische Fachberichte, Bd 31, 1967, str. 88.

(3) *Carassa:* Telecommunicazioni spaziali, Eletronica 1, 1967, str. 2 i dalje.

(4) *E. Brady:* Spacecraft Technology for Satellite communication System, El. communication, Vol 39, No 1, 1964, str. 144.

(5) *V. A. Altowsky:* Evolution recente et perspectives des Satelites de telecommunications, V^e symposium spatial Europeen, München 1965.

(6) CCIR Documents de la XI^e Assemblée Pleniere, Oslo 1966, Vol IV/2, Geneve 1966, str. 444.

(7) EBU Com. T (N) 9 — Reports from Telespazio, 30. novembar 1967, str. 7.

(8) CCIR Doc IV/3. januar 1968.

(9) *Leingang:* Zweite Antennenanlage der Erdfunkstelle Raisting, Siemens Zeitschrift Heft 11, 1969, str. 847—853.

6.

Antene za satelitske veze

Kod satelitskih veza, neovisno o tome kakve su veze u pitanju, posebno je kritičan dio veze satelit-Zemlja, zbog ograničenih mogućnosti satelitske antene ili ograničenja koja se, iz raznih razloga, postavljaju na EIRP. Uz dana ograničenja isijane snage, bit će za postizavanje potrebnog odnosa signal/šum, uz gušenje propagacije dano udaljenošću i frekvencijom i, prema tome — u principu — fiksno, jedini faktor na koji će se moći uticati antene zemaljskih stanica, prijemnik koji se na njih nadovezuje te — u ograničenom opsegu — širina pojasa u kome se prenos vrši.

Svojstva antena o kojima se u prvom redu govori, kad se govori o antenama, dadu se svesti na odnose između geometrijskih dimenzija sistema, kuta ili širine glavne latice kod pol snage i dobitka antene koji će, kod antena interesantnih za naša razmatranja, biti redovno dan kao dobitak prema izotropnom radiatoru.

Kod optimalnog odnosa bočnih latica antene i njezinog dobitka, bit će u obje glavne ravnine širina snopa — 2δ — na pol snage (širina 3 db) dana odnosom (1):

$$2\delta = \frac{65^0\,\lambda}{D} \tag{6.1}$$

gdje je D promjer kružne aperture u istim jedinicama kao i λ. S druge strane dan je dobitak antene izrazom

$$g = \frac{27\,000}{(2\delta)^2} \tag{6.2}$$

ili, ako je $G = 10 \log g$ (2):

$$G = 44{,}3 - 20 \log 2\delta \quad \text{db} \tag{6.3}$$

Ako širina snopa na pol snage nije u obje međusobno okomite ravnine jednaka (slučaj interesantan za mnoge planove radiodifuznih satelita) prelazi (6.2) u

$$g = \frac{27\,000}{2\delta_1\, 2\delta_2}$$

gdje su δ_1 i δ_2 odgovarajuće širine snopa u svakoj od ravnina.

Uvrstimo li vrijednost za 2δ u izraz za g, dobivamo

$$g = \frac{6{,}4\,D^2}{\lambda^2}$$

ili, nakon malih transformacija

$$g = 0{,}65\,\frac{4\pi}{\lambda^2}\,A \qquad (6.4)$$

gdje je $A = D^2\pi/4$ površina aperture. Vidimo da je dobitak u stvari 65% dobitka jednolično uzbuđene aperture. I gornji se izraz češće upotrebljava u obliku

$$g = 0{,}65\left(\frac{D\pi}{\lambda}\right)^2 = 0{,}711 \cdot 10^{-4} \cdot D^2 \cdot f^2$$

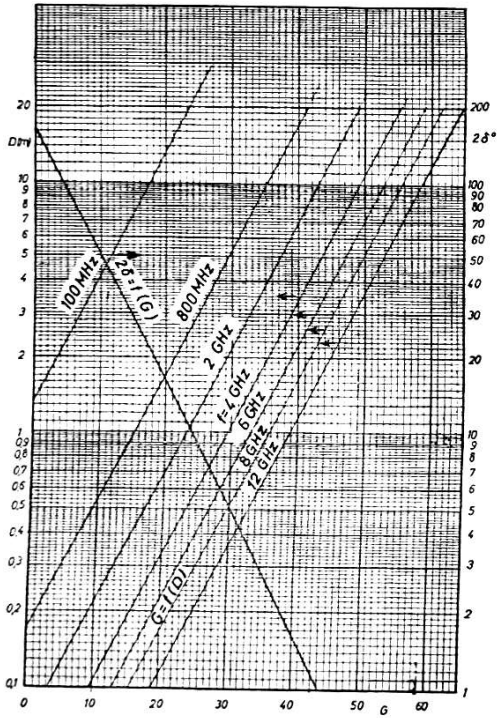
odnosno

$$G = 20 \log D + 20 \log f - 41{,}48 \quad \text{db} \qquad (6.5)$$

uz D u metrima (promjer kružnog otvora reflektora) i f u MHz. Izraz koji daje (3) baziran je na pretpostavci da je dobitak dan kao 50% dobitka jednolično uzbuđene aperture pa glasi

$$G = 20 \log D + 20 \log f - 42{,}6 \quad \text{db} \qquad (6.5a)$$

Dobitak G kao funkcija od D za razne f i kut 2δ kao funkciju od G vidimo na slici 6.1.



Slika 6.1

Kolika je stvarna upotrebna vrijednost gornjih izraza može pokazati nekoliko izvedenih, izmjerenih, antena za zemaljske stanice (4), (5).

Goonhilly: D = 26 m

G (izmjereno)	58,2 db kod f = 4 GHz
	59 db kod f = 6 GHz
iz (6.5)	58,82 db za f = 4 GHz
	62,38 db za f = 6 GHz

Raisting: D = 25 m

G (izmjereno)	58,4 ± 0,6 db kod f = 4,16 GHz
	61,5 ± 0,8 db kod f = 6,30 GHz
iz (6.5)	58,80 db za f = 4,16 GHz
	62,24 db za f = 6,30 GHz

Mill Vilage: D = 25,9 m

G (izmjereno)	58,9 ± 0,3 db kod f = 4,1 GHz
	60,2 ± 1 db kod f = 6,3 GHz
iz (6.5)	59,04 db za f = 4,1 GHz
	63,78 db za f = 6,3 GHz

Razlike između računskih i mjerenih vrijednosti dolaze u prvom redu kao posljedica razlike u pretpostavljenom i stvarnom faktoru iskoristivosti aperture.

Za zemaljske stanice daje CCIR (6) karakteristike isijavanja za sektor preko $\pm 1^0$ od osi karakteristike isijavanja antene. Niz primjera za izvedene antene s promjerom otvora 3 do 27 m i dobitkom između 45 i 60 db (za zemaljske stanice dolaze u obzir antene s promjerom otvora 10 do 26 m) pokazuje da su, osim u neposrednoj blizini osi glavnog snopa, diagrami međusobno slični i dobro aproksimirani izrazom

$$G = 32 - 25 \log \psi \quad \text{db} \qquad (6.6)$$

gdje je ψ^0 kut prema osi glavnog snopa.

Za funkciju zemaljske stanice vrlo je upotrebljiv i koristan podatak o tzv. faktoru kvaliteta sistema definiranom kao

$$10 \log \frac{\text{dobitak antene}}{\text{temperatura šuma antene u}^0\text{K}} \qquad (6.7)$$

Pri tome je korisno prenijeti dobitak antene i temperaturu šuma sistema na ulaz u prijemnik s malenim šumom.

Iako se faktor kvaliteta može određivati odvojenim mjerenjem veličina dobitak i temperatura šuma, mjerenja vršena na ovaj način relativno su nepouzdana i vezana na veće greške. U (7) dana je metoda za računanje tog faktora mjerenjem odnosa snaga/šum na izlazu iz prijemnika uz primjenu, kao izvora, poznate radiozvijezde. Tada je

$$\frac{g}{T^{(o)}} = \frac{8\pi k}{\lambda^2\,S(f)}\,(r - 1) \qquad (6.8)$$

gdje je

k = Boltzmannova konstanta
λ = duljina vala (m)
S(f) = gustoća toka isijavanja stelarnog radioizvora ($W\,m^{-2}\,Hz^{-1}$) kod frekvencije f, u momentu mjerenja
$r = (p_n + p_{st})/p_n$
p_n = snaga šuma koju ima sistem na temperaturi sistema T
p_{st} = dodatna snaga šuma uz antenu usmjerenu na radiozvijezdu
g i $T^{(o)}$ su referirani na ulaz prijemnika.

Faktorima u gornjem izrazu vođeno je računa o činjenici da je raspodjela polarizacije isijane energije radiozvijezda aleatorna, pa da se prima samo dio te energije koji odgovara polarizaciji prijemne antene. Gustoća toka *S(f)* dobiva se iz radioastronomskih mjerenja. Prednost ove metode evidentna je: mjesto mjerenja apsolutnih vrijednosti svodi se mjerenje na određivanje odnosa *r*.

Od mogućih zvijezda izgleda najzgodnija Cassiopea A, Cignus A i Taurus A, za mjerenje kod 4 GHz. Potrebno je, dakako, da se prilikom mjerenja vide pod dovoljno visokim kutem, jednako kao što je potrebno da kutna apertura radiozvijezde bude manja od one glavnog snopa antene (8).

Za neke radiozvijezde dana je gustoća toka za 4 GHz kako slijedi:

Cassiopea A $S(4) = 1065 \cdot 10^{-26}\,W\,m^{-2}\,Hz^{-1}$
Taurus A $S(4) = 717 \cdot 10^{-26}\,W\,m^{-2}\,Hz^{-1}$
Cignus A $S(4) = 495 \cdot 10^{-26}\,W\,m^{-2}\,Hz^{-1}$

Napomenimo da tok Cassiope-e pada s vremenom (9), (10). (U (8) dana je vrijednost $S\ (4) = 1300 \cdot 10^{-26}\,W\,m^{-2}\,Hz^{-1}$.)

Za neke navedene antene imamo slijedeće faktore kvaliteta*:

Raisting G/T = 40,7 ± 0,8 db kod 4 GHz, za kut iznad horizonta 5° i linearnu polarizaciju

Mill Vilage G/T = 42,1 ± 0,6 db za kut 90° iznad horizonta
40,8 ± 0,6 db za kut 7,5° iznad horizonta
40,5 ± 0,6 db za kut 5° iznad horizonta

Norma INTELSATA je G/T ≥ 40,7 db (9).

Drugi faktor koji će utjecati na odnos signal/šum — konačni cilj rada na projektu svake veze — je prijemnik koji je sa svojim stupnjevima pojačanja i miješanja dugo predstavljao osnovni izvor šuma.

Kad se naime radi o premoštenju velikih udaljenosti, komunikaciona tehnika nalazi se uvijek pred svladavanjem gubitaka između mjesta emitiranja i mjesta prijema. Ti su gubici dani a veličine na koje se može uticati, da bi se oni pokrili, su snaga odašiljača i osjetljivost prijemnika, za dani kvantum informacija. Snaga odašiljača ne može se, iz čitavog niza razloga, povećavati po volji, čak ni u području frekvencija u kojem tehničke mogućnosti za to postoje, pa je problem razvoja komunikacija bio problem konstrukcije prijemnika s većom osjetljivošću ili manjim šumom odnosno temperaturom šuma.

* G/T dan gore, očito je dan kao $10 \log (g/T^{(o)})$. Oznaka G/T ipak je uobičajena u literaturi.

Do pred petnaestak godina smatralo se je da je doseg bio postignut u slijedećim granicama: kod frekvencija do 100 MHz temperatura šuma bila je negdje oko 300° K što je donekle odgovaralo temperaturi prostora. Iznad ove frekvencije temperatura šuma pojačala raste i prema 1 GHz ide prema 2000° K. Kod frekvencije od 10 GHz bilo je uobičajeno, mjesto direktnog pojačanja, ulaz izvesti kao kristalno miješalo a daljnja prerada signala bila je u međufrekvenciji. Neovisno o frekvenciji postizavale su se vrijednosti od cca 2000° K. Očito je da je poboljšanje bilo poželjno čak i za veze na Zemlji, kod kojih već medij daje temperaturu reda 300° K. Kod satelitskih veza bilo je poželjno znatno veće poboljšanje. Cijevi s putujućim valovima (TWT) s malenim šumom, kao predpojačala, dolazile su na 400—800° K.

U godinama 1953. do 1954. došli su neovisno Weber i Townes te Basov i Prokhorov na princip kojeg je Townes 1954. nazvao MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Nekako u isto vrijeme počelo je ponovno ispitivanje jednog ranije poznatog postupka — primjene upravljanih reaktancija za pojačavanje. Kod ovog postupka poznatog kao »parametarska pojačala« nema pomičnih nosioca naboja u mehanizmu pojačanja, pa ni efekta »sačme«, neizbježivog inače kod pojačala s elektronkama i poluvodičima. U oba slučaja je izvor energije izmjenična struja s frekvencijom općenito višom od frekvencije signala.

Moguća minimalna temperatura šuma kod MASERA određena je kvantnim šumom — što u mikrovalnom području znači manje od 1° K, a u slučaju parametarskih pojačala ta je temperatura određena šumom jednog kruga koji učestvuje u procesu tzv. »Idling« kruga.

Praktički se kod MASERA postizavaju temperature šuma 4° K a kod hlađenih parametarskih pojačala 20° K. Temperature hlađenja odgovaraju temperaturama tekućeg helija odnosno dušika (11), (12), (13), (14), (15).

Hlađeni MASER-i i parametarska pojačala prebacila su težište s prijemnika na antenski sistem a to znači antenu u užem smislu, s ambijentom u kome se ona nalazi, te vezama između nje i ulaza u prijemnik na koji se referiramo. Od ovog sistema u cijelosti, moramo, dakle, tražiti da ima veliki dobitak uz niske gubitke — nisku temperaturu šuma — te male e i neizražene bočne latice dijagrama isijavanja.

U preporukama IRE-a pojavljuje se, s jednakim pravom upotrebe, definicija šuma (Rauschzahl, Noise figur) i efektivne temperature šuma (Efektive Rausch-temperatur, Effective noise temperature) Primjena jedne ili druge definicije ili veličine određena je isključivo praktičkim gledanjima: kod niskošumnih parametarskih i MASER pojačala izgleda da je opravdano i svrsishodnije primjeniti efektivnu temperaturu šuma.

Kao što smo rekli, šum na ulazu u prijemnik sastoji se dijelom od vanjskih smetnji (paraziti, atmosferske smetnje, kozmički šum, solarni šum itd.), a drugim dijelom od smetnji internog porijekla, dakle onih koje nastaju na putu prerade signala unutar uređaja za pojačavanje signala. Osim parazita i atmosferskih smetnji, ovi šumovi termičkog su porijekla. Sva tjelesa na temperaturi T isijavaju energiju šuma a apsorpcija radioelektričke energije kod koje dolazi do transformacije te energije u toplinu, izvor je šuma.

Maksimalna snaga šuma raspoloživa na izlazu izvora jednog signala — na primjer antene — u pojasu širine b, dana je izrazom

$$p_b = kT^{(o)}b \qquad (6.9)$$

gdje je k = Beltzmanova konstanta, tj. $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Joul/^{0} K ili — 228,6 dbW/^{0}K, b je dano u Hz a $T^{(o)}$ je temperatura izvora (antene) u ^{0}K. Odnos signal/šum izvora dan je onda sa

$$\frac{p}{p_b} = \frac{p}{kT^{(o)}b} \tag{6.10}$$

u slučaju prijemne antene. Ona će primati korisni signal sa snagom p_R, a osim njega primat će i šumove nebeskih tijela koja još ulaze u snop. Spontana emisija galaktičkog šuma navodi nas da otporu isijavanja, koji je istovremeno i interni otpor ekvivalentnog izvora, pripišemo temperaturu $T^{(o)} = T_A{}^{(o)}$

$$p_b = kT_A{}^{(o)}b \tag{6.9a}$$

predstavlja maksimalnu raspoloživu snagu šuma na izlazu antene. Pri tome $T_A{}^{(o)}$ treba smatrati radioelektričkom temperaturom. Kako je rečeno, snazi šuma p_b doprinosit će:

a) galaktički šum
b) šum koji odgovara atmosferskoj apsorpciji (jer je svaka apsorpcija generator šuma)
c) termičke radijacije Zemlje s temperaturom T_0 koje primaju sekundarne latice antene.

$T_A{}^{(o)}$ će u velikoj mjeri biti ovisna o regiji neba na koju je antena uperena i o frekvenciji. Naglasimo ponovno da $T_A{}^{(o)}$ nije jednaka temperaturi tijela koje se nalazi u snopu, jer je ovisna i o dijelu kojim snop to tijelo zahvaća.

Što se tiče prijemnika, odnosi bi se mogli izvući iz slijedećeg:

Ako su p_R i $kT^{(o)}b$ maksimalne snage signala i šuma raspoložive na ulazu u predpojačalo, g pojačanje, p_s i p_b snage signala i šuma na ulazu, bit će odnos signala prema snazi šuma na izlazu niži od odnosa signala prema snazi šuma na ulazu. Odnos

$$F_0 = (p_R/kT^{(o)}b)/(p_s/p_b) \tag{6.11}$$

definiran za temperaturu $T^{(o)} = T_0 = 290^0$ K, nazvat ćemo faktorom šuma.

Faktor šuma, kod bilo koje temperature, bit će vezan na faktor šuma kod temperature T_0 odnosom

$$F = \frac{T_0}{T^{(o)}}(F_0 - 1) + 1 \tag{6.12}$$

Ako je pojačanje predpojačala g, onda će uz gornje oznake vrijediti:

$$p_s = gp_R$$

$$p_b = g(kT_0\,b + p_{ib})$$

gdje je p_{ib}, interna snaga šuma koja nastaje u predpojačalu. Tada možemo pisati

$$F = \frac{p_R}{kT_0b}\,\frac{g(kT_0b + p_{ib})}{gp_R} = 1 + \frac{p_{ib}}{kT_0b}$$

iz čega slijedi

$$p_{ib} = (F - 1)\,kT_0b \tag{6.13}$$

Faktor F bit će ovisan o tipu predpojačala odnosno njegovu sastavu (elektronke, tranzistori, tunel-diode, parametrička pojačala, MASER-i . . .). Ako sa $T_R{}^{(o)}$ označimo temperaturu šuma predpojačala, možemo pisati

$$p_{ib} = kT_R{}^{(o)}b$$

gdje je očito

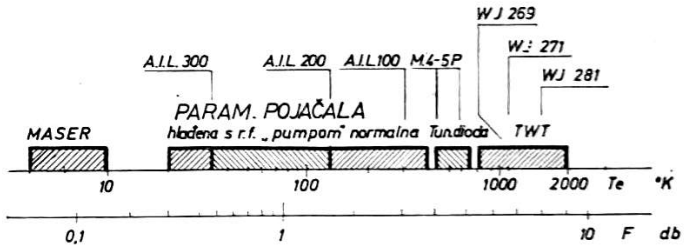
$$T_R{}^{(o)} = (F - 1)\,T_0 \tag{6.14}$$

Ova temperatura karakterizira pojačala jednoznačeno kao i faktor F. Savršeno pojačalo ima, lako je vidjete, $T_R{}^{(o)}$ = „0" odnosno F = 1.

Parametrička pojačala imaju praktički, kako smo rekli, odnos šuma reda 2 db kod 2000 MHz a pojačala s tuneldiodama 2,5 do 4 db u pojasu 200 do 2000 MHz. Za parametrička pojačala bila bi dakle temperatura šuma cca 170^0 K a ona za MASER-e reda 20^0 K, čemu bi opet odgovarao

$$F = \frac{T_R{}^{(o)}}{T_0} + 1 = 1{,}069 = 0{,}3\text{ db}$$

Na slici 6.2 (16) vidimo granice za $T_R{}^{(o)}$ odnosno F za neke primjere realiziranih pojačala iz raznih grupa.



Slika 6.2

Između antene i ulaza predpojačala može se nalaziti niz elemenata (valovodi, kablovi, filtri, cirkulatori . . .), koji će svojim gubicima, kako smo gore rekli, moći biti smatrani generatorima šuma.

Ako označimo sa p_u snagu na ulazu a p_i snagu na izlazu ovakvog jednog elementa, onda će faktor gušenja biti dan kao odnos

$$l = \frac{p_i}{p_u} \tag{6.15}$$

pa će uvijek biti $l < 1$. Snaga koja će se pretvoriti u toplinu očito je

$$p_u - p_i = p_u - lp_u = p_u\,(1 - l) \tag{6.16}$$

a snaga šuma upućena na predpojačalo

$$kT_0b\,(1 - l) \tag{6.17}$$

Uz temperaturu šuma antene $T_A{}^{(o)}$ mi ćemo na izlazu prigušnog člana imati

$$kT_A^{(o)}bl \qquad (6.18)$$

kao šum antene na koji je djelovao prigušni član i

$$kT_0b\,(1-l) \qquad (6.19)$$

kao šum koji je posljedica gubitaka u prigušnom članu, pa je ukupna snaga šuma koji upućujemo predpojačalu

$$p_b = kb\,[T_A l + T_0\,(1-l)] \qquad (6.20)$$

Ovoj snazi možemo pridijeliti novu temperaturu šuma

$$T_A^{(o)\prime} = T_A^{(o)} l + T_0\,(1-l) \qquad (6.21)$$

Ako su gubici gušenja veliki, a to znači l vrlo maleno, težit će $T_A^{(o)\prime}$ vrijednosti T_0. Uz $T_0 = 290^0$ K i 10 log $l = -0{,}1$ db, bit će doprinos prigušenog člana $T_0(1-l) = 6{,}6^0$ K. Uz 10 log $l = -1$ db taj je doprinos već $59{,}6^0$.

No neće samo elementi između antene i predpojačala biti oni koji će pogoršavati temperaturne odnose temperature šuma. I pred samom antenom susrećemo često zaštitne konstrukcije, iz posebnih masa, koje imaju malene ali ipak konačne gubitke. Ovakve konstrukcije, poznato pod imenom »radom«-a, uticat će svojom apsorpcijom, koja će moći biti povećana slojem vode koji se na radomima može nakupiti. Nalazi li se radom na temperaturi T_0 a faktor apsorpcije neka mu je *l*, bit će ekvivalentna temperatura radoma

$$T_r^{(o)} = (1-l)\,T_0 \qquad (6.22)$$

Uz faktor apsorpcije dan sa 10 log $l = 0{,}2$ db ($l = 0{,}955$) bit će $T_r^{(o)} = 13{,}05^0$ K. Ako je temperatura izvora $T_S^{(o)}$ a na izvor se gleda kroz medium s temperaturom šuma $T_m^{(o)}$, bit će efektivna temperatura gledana sa strane promatrača

$$T_e^{(o)} = l\,T_S^{(o)} + (1-l)\,T_m^{(o)} \qquad (6.23)$$

ako je l faktor apsorpcije ($l < 1$).

Ovo će, dakako, vrijediti i za kišu kao medij kroz koji će antena prijemnika gledati na primjer na nebo s temperaturom $T_S^{(o)}$ (faktor apsorpcije kiše l_k).

Gledamo li sada, konačno, na čitav sistem, sa svim elementima kao gore, možemo za temperaturu šuma sistema postaviti

$$T^{(o)} = T_R^{(o)} + (1-l)\,T_0 + l\;T_A^{(o)} \qquad {}^0\text{K} \qquad (6.24)$$

gdje je

$T_R^{(o)}$ = temperatura šuma predpojačala
T_0 = temperatura šuma člana između antene i predpojačala (obično 290^0 K)
$T_A^{(o)}$ = temperatura šuma antene.

Ova posljednja može se sastojati od doprinosa »neba« $T_S^{(o)}$ i doprinosa »Zemlje« $T_g^{(o)}$. Ako dakle pišemo $T_A^{(o)} = T_S^{(o)} + T_g^{(o)}$, može se gornji izraz pojaviti u obliku

$$T^{(o)} = T_R^{(o)} + (1-l)\,T_0 + l\,(T_S^{(o)} + T_g^{(o)}) \qquad {}^0\text{K} \qquad (6.24a)$$

Prisustvo kiše izmjenilo bi, ako je temperatura kiše $T_m^{(o)}$ a faktor apsorpcije l_k, gornji izraz u

$$T^{(o)} = T_R^{(o)} + (1-l)\,T_0 + lT_g^{(o)} + ll_kT_S^{(o)} + l\,(1-l_k)\,T_m^{(o)} \qquad {}^0\text{K} \qquad (6.25)$$

Ovi izrazi odgovaraju onima iz (17) gdje su faktori apsorpcije dani kao pozitivno gušenje (+ db) pa ovaj posljednji izraz (uz oznake izmjenjene na odgovarajući način) glasi:

$$T^{(o)} = T_R^{(o)} + \left(\frac{l'-1}{l'}\right) T_0 + \frac{T_g^{(o)}}{l'} + \frac{T_S^{(o)}}{l'l'_k} + \frac{l'-1}{l'l'_k}\,T_k^{(o)} \qquad {}^0\text{K} \qquad (6.25a)$$

Očito je da je ovdje $l' = 1/l$ odnosno $l'_k = 1/l_k$, dakle odnos snaga na ulazu prema snazi na izlazu. U literaturi naći ćemo (18), (19) za temperaturu šuma sistema i izraz koji bi pisan na isti način i uz iste oznake glasio u početnom obliku

$$T^{(o)} = T_A^{(o)} + \frac{1-l}{l}\,T_0 + \frac{T_R^{(o)}}{l} \qquad {}^0\text{K} \qquad (6.26)$$

a u ostalim oblicima, dopunjen na odgovarajući način, kao i ostali gore navedeni izrazi. Usporedimo li ovaj izraz s odgovarajućim gore (6.24) vidimo da je

$$T^{(o)\prime} = \frac{T^{(o)}}{l}$$

Pri tome je razlika između dvaju izraza uvjetovana činjenicom, koja je i iz forme vidljiva, da je temperatura šuma sistema u ovom posljednjem izrazu referirana na »ravninu« antene i daje vrijednost koja je mjerodavna za osjetljivost ukupnog prijemnog sistema. Prva vrijednost referira se međutim na »ravninu« prijemnika odnosno predpojačala. Pri upotrebi obaju izraza potrebno je točno znati što se hoće. U literaturi, na žalost, ne nalaze se uvijek potrebna objašnjenja. U (18) dan je kao primjer

$$T_A^{(o)} = T_g^{(o)} + T_S^{(o)} = 55^0\text{ K} + 10^0\text{ K} = 65^0\text{ K}$$
$$L = -1\text{ db } (= 10 \log l)$$
$$T_R^{(o)} = 25^\circ\text{ K}$$
$$T_0 = 290^0\text{ K}$$

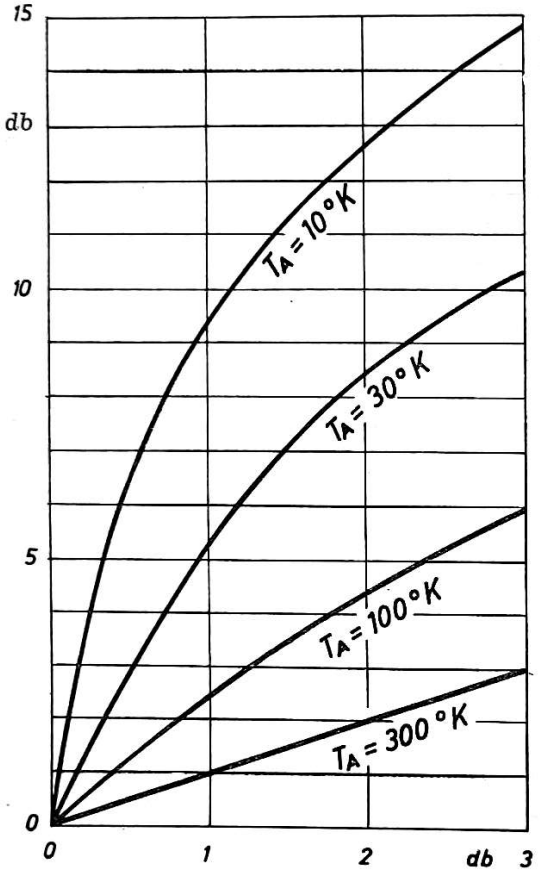
Temperatura šuma sistema u ravnini antene je, kao što je lako vidjeti:

$$T_A^{(o)} = 65 + \frac{1-0{,}7943}{0{,}7943}\,290 + \frac{25}{0{,}7943} = 171{,}59^0\text{ K}$$

Kod temperature okoline 290^0 K i malenih gušenja može se temperatura šuma sistema znatno povećati i malenim povećanjem gušenja (u gornjem slučaju povećanje gušenja za 0,1 db povećava temperaturu šuma sistema za $9{,}3^0$ K na $180{,}9^0$ K).

Kako posebice cirkulator, jedan od elemenata koji se može naći na putu između antene i ulaznog pojačala prijemnika, može imati relativno velike gubitke, bit će posljedica tih gubitaka povećanje temperature šuma sistema i degradacija kvaliteta prijemnog uređaja, pa će biti potrebno i cirkulatore

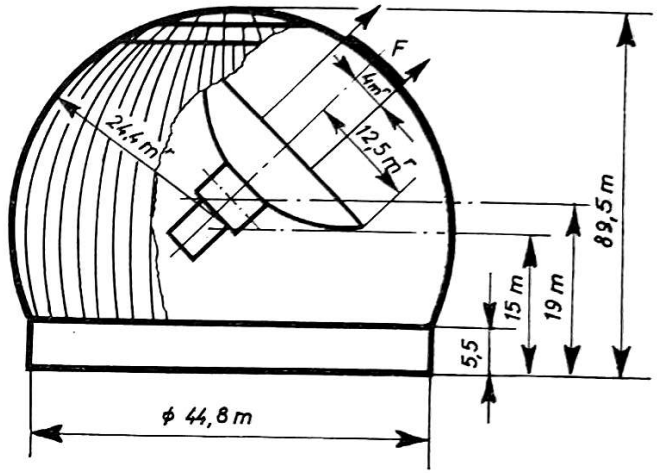
hladiti, ako su ulazna pojačala hlađena. S tim u vezi potrebno je bilo riješiti i problem čuvanja svojstava cirkulatora kod ekstremno niskih temperatura. Problemi ove vrste objašnjavaju, između ostalog, i tendenciju da se »glava« prijemnika sa svojim ulaznim dijelom što uže veže na samu antenu. Ovo se vrlo reljefno opravdava slikom 6.3 (20), (21) s koje se vidi kvarenje odnosa signal/šum u ovisnosti o povećanju gušenja. Evidentna je i vrlo važna činjenica da je i kod malenog gušenja, ako je T_A maleno, kvarenje odnosa signal/šum znatno (kod $T_A^{(o)} = 10^0$ K i L = 0,5 db kvarenje odnosa je 6,68 db, kod $T_A^{(o)} = 100^0$ K kvarenje je 1,33 db).



Slika 6.3

Iz čitavog niza razloga prevladavalo je dugo vremena mišljenje da je velike antenske sisteme za zemaljske stanice, potrebno ugrađivati u kućišta koja bi, uz malene gubitke, predstavljala adekvatnu vanjsku zaštitu. Kako se situacija ne bi mijenjala u pogledu uticaja kojeg bi takvo kućište ipak vršilo, kad se položaj antene u prostoru mijenja, u vezi s praćenjem satelita, izvode se ova kućišta u obliku kugle kojoj je središte u blizini presjecišta osiju rotacije (sl. 6.4). Novije stanice grade se bez ovog kućišta — radoma (22), zbog gubitaka koje radom za sobom povlači, posebice ako je na njemu sloj vode kao

posljedica kiše. Sloj vode od 0,125 mm kod antene promjera 25 m ima, na primjer, ukupni efekat smanjenja faktora kvaliteta na iznos koji ima antena promjera 18 m bez radoma (23).



Slika 6.4

Kvalitet antenskog sistema bit će ovisan i o karakteristici isijavanja. U običajenoj praksi telekomunikacija najveći dio diagrama isijavanja otvoren je prema raznim objektima na Zemljii, pa šum antene ima upravo njih kao izvore a oni su svi, praktički, na temperaturi okoline te antenu kao sekundarni izvor šuma možemo predstaviti otporom antene na temperaturi okoline.

Situacija će biti bitno drugačija ako se radi o vrlo usmjerenim antenama, s glavnom laticom karakteristike isijavanja dovoljno udaljenom od objekta na Zemlji. Snaga šuma koju će antena davati bit će i sada suma termičkih radijacija koje dolaze iz svih smjerova a pri tome će rezultati, dakako, biti ovisni i o karakteristici isijavanja. Najveći udio doprinosi glavna latica, ali je ona redovno uperena prema nebu koje, uglavnom, predstavlja »hladan«, dakle slab izvor termičkih radijacija. Ako su sporedne latice uperene na razne objekte na Zemlji slabo izražene, bit će doprinos, inače značajnog izvora radijacija, malen, pa će i temperatura $T_A^{(o)}$ antene biti niska: moći će se govoriti o »hladnoj« anteni, pojmu koji dolazi do izražaja, kako smo spomenuli, sve jače zbog napretka u gradnji pojačala s niskom temperaturom šuma (24).

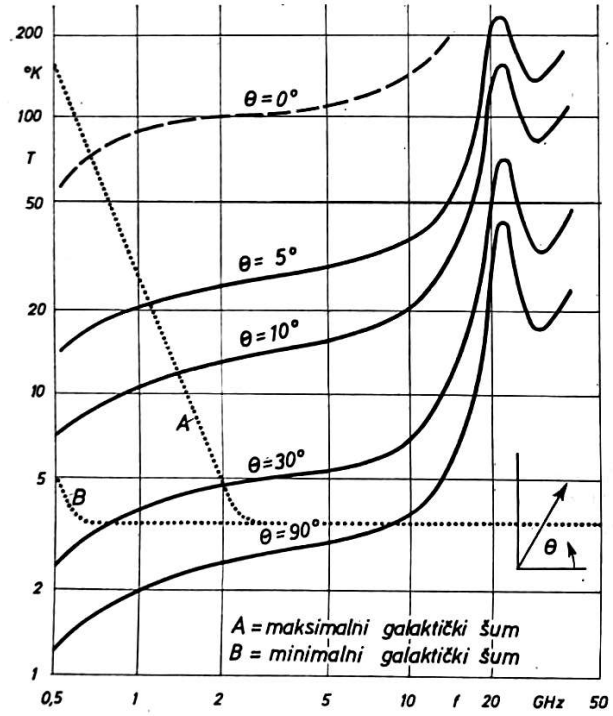
Položaj na kome će se redovno postavljati antene zemaljskih stanica, odnosno locirati stanice same, bit će, iz razloga navedenih na drugom mjestu (poglavlje 10, vidi posebice sl. 1 s temperaturom šuma), udubljenja s blagim nagibom bočnih površina, a antena se redovno neće upotrebljavati s elevacijom nižom od 7° (INTELSAT traži garanciju za neke karakteristike kod 5°). Uz glavnu laticu uperenu prema nebu, može odgovarajuća temperatura šuma biti 5° K do 10° K, ukoliko, dakako, antena nije usmjerena baš na Sunce, neku od radiozvijezda ili galaksija. Ovo vrijedi i za bočne latice uperene prema nebu, za koje bi trebalo imati osiguranje da će biti zaštićene od sunčevih radijacija, što je — posebice u vrijeme malene sunčeve aktivnosti — lako. Napomenimo

usput da je kut pod kojim se vidi Sunce, reda $0{,}5 \times 0{,}5^0$, dosta velik i da raste s rastućom aktivnošću.

Ako se radi o prijemu s geostacionarnih satelita i antenama sa snopom širine 5^0 ili manje, može nivo šuma znatno porasti kroz nekoliko minuta za vrijeme kojih se Sunce nalazi u snopu antene. Taj će se fenomen manifestirati očito danju, kroz nekoliko uzastopnih dana u proljeće i u jesen. Za antene promjera 10 m, pokazuju analize da će smetnje od Sunca nastupiti samo jednom dnevno kroz jedan tjedan, dvaput godišnje. Maksimalno vrijeme trajanja smetnji je manje od 9 minuta pojedinačno, a manje od 2 sata godišnje (25).

Osim radijacija termičke prirode, potrebno je u račun uzeti i one koje se manifestiraju kao paraziti sa Zemlje (radar, mikrovalne veze, harmonike raznih odašiljača, industrijski paraziti i slično). Postavljanje antena na zaštićenim lokacijama, kako je spomenuto gore, može znatno smanjiti uticaj ovih vrsta smetnje.

Antena će dalje, kako je spomenuto, u svim smjerovima gledati na medij koji, u većoj ili manjoj mjeri, apsorbira isijavanja na frekvencijama koje su u pitanju, a isto tako onda isijava u smjeru antene ali u znatno manjoj mjeri nego što bi to radilo crno tijelo uz istu temperaturu.

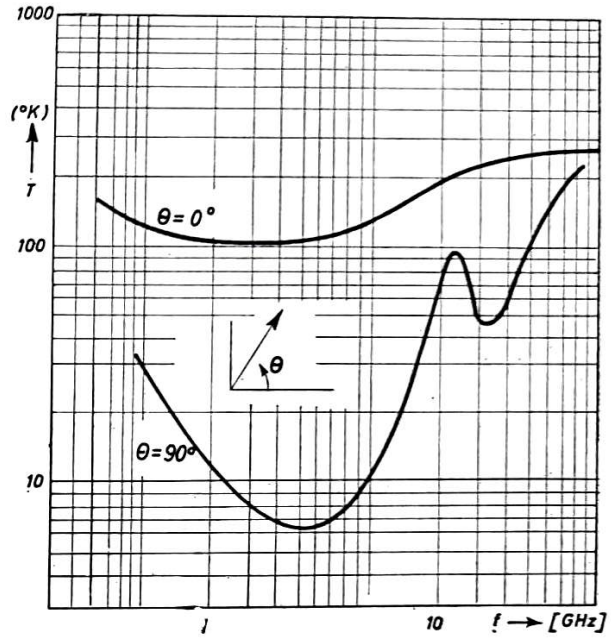


Slika 6.5

Na temelju eksperimentalno dobivenih vrijednosti za kisik i vodenu paru, Hogg je izvršio račune koji su kao rezultat dali vrijednosti sa slike 6.5 za jednu srednju atmosferu u umjerenom pojasu. Iz slike se vidi da je na primjer, za

5 GHz, u smjeru zenita temperatura cca 3^0 K, a u smjeru 80^0 od zenita (elevacija 10^0) je ona cca 15^0 K. Za frekvencije iznad 10 GHz apsorpcija je u brzom porastu a za one ispod 2 GHz raste šum galaksije a problem izrade antena s uskim snopom glavne latice postaje sve teži zbog porasta dimenzije antene.

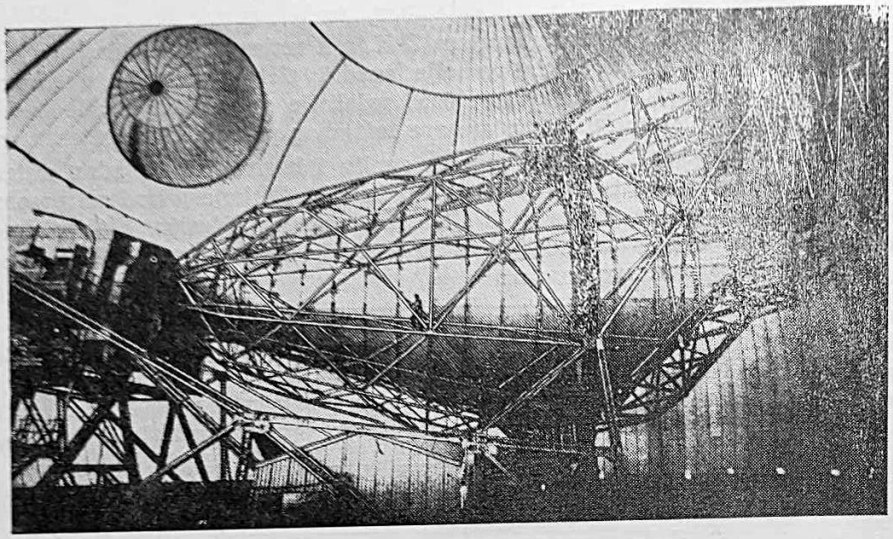
Temperaturu šuma za smjer prema zenitu i horizontu, za jednu antenu promjera 64 cm i razne frekvencije vidimo na slici 6.6 koja je rađena posebno u vezi s razmatranjem područja 12 GHz za satelitsku difuziju. Vidimo da je za smjer zenita temperatura šuma za to područje nešto iznad 40^0 K.



Sl. 6.6

U svemu što je o antenama bilo govoreno, pretpostavljalo se je da je konstrukcija antena takova, da se potrebno usmjerenje vrši refleksijom a ne difrakcijom: dielektričke leće unosile bi nedopustivo veliku apsorpciju. Postoji, međutim, niz sistema i varijanti koje primjenjuju refleksiju, a ono što ih posebice međusobno razlikuje je način na koji je sistem uzbuđen, odnosno na koji se primljena energija prenosi na prijemnik.

Kod antena za satelitske komunikacije prve zemaljske stanice (Andover u USA a poslije Pleumeur-Bodou u Francuskoj) bile su antene u obliku roga (antenne cornet, horn aerial, Horn-parabol). U rogu ili lijevku, na čijem se užem kraju nalazi uzbuđivač i koji je vrlo dugačak prema duljini vala, dolazi do propagacije kuglastih valova. Na kraju lijevka, pod kutem 90^0, nalazi se paraboloidni reflektor koji kuglaste valove pretvara u ravne i isijava. Apertura ove antene posve je slobodna i to je jedna od prednosti ove antene. Uz neke druge koje ćemo još vidjeti, ima ovaj tip antene i neke mane mehaničke naravi. U prvom redu duljina antene je 54 m. Uz nesimetrični reflektor s većom osi skoro 30 m, promjer otvora antene je svega 27 m. Naglasimo da je antena smještena pod radom promjera 64 m i visine 49 m (slika 6.7).



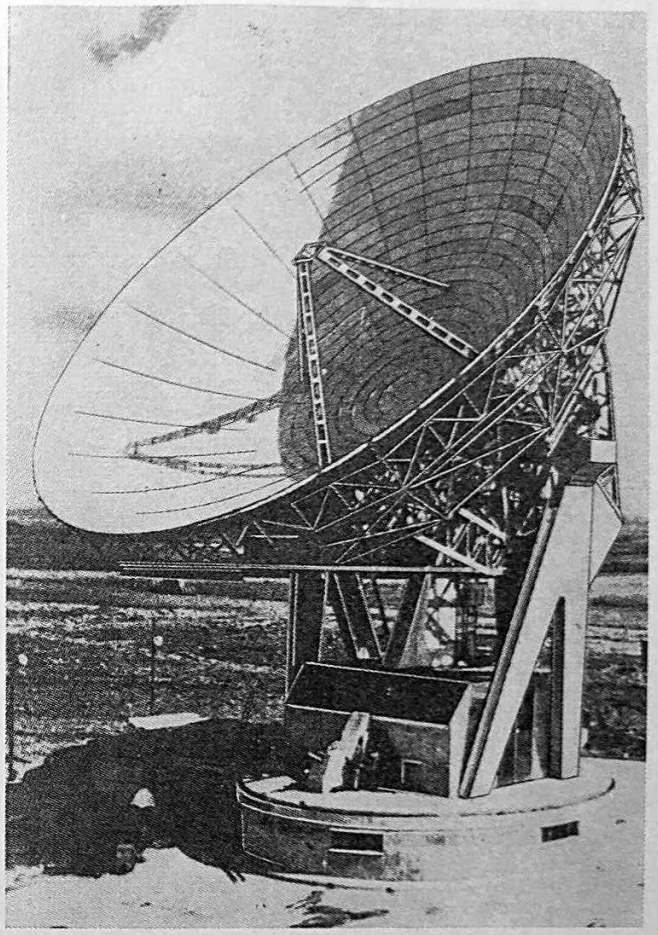
Slika 6.7

Druga evropska zemaljska stanica Goonhilly Downs imala je za antenu rotaciono-simetrični paraboloidni reflektor promjera 26 m s primarnim uzbuđivačem postavljenim pred reflektor (kružni valovod za 4 i 6 GHz, jedan u drugome). Uzbuđivač su držala tri nosača koji su istovremeno služili kao vodioci valovoda. Usprkos upotrebe velikog presjeka valovoda, gubici su kod 4 GHz 0,45 db, što dakako ostavlja posljedice na temperaturi šuma sistema, jednako kao što nosioci djeluju i na dobitak (slika 6.8).

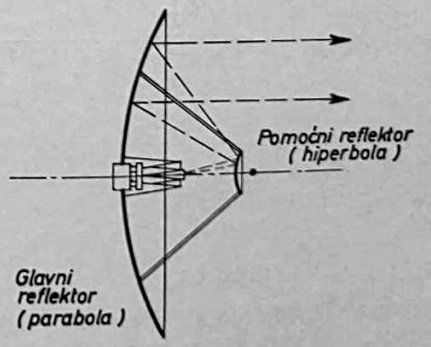
Iz ovih posljednjih razloga zadržan je i kod danas, može se mirno reći, standardnog tipa Cassegrain antena, paraboloidni reflektor kao baza ali je za napajanje preuzet iz optike poznati sistem Cassegrain (slika 6.9). Ispred žarišta glavnog reflektora nalazi se konveksni hiperboloidni pomoćni reflektor koji, prema geometrijsko-optičkim zakonima, vrši fazno korektnu promjenu smjera propagacije energije, koju isijava primarni uzbuđivač, smješten sada u tjemenu ili blizu tjemena glavnog reflektora i vezan neposredno na uređaje (ulazno pojačalo prijemnika u prvom redu). I u ovom slučaju trebamo nosioce za pomoćni reflektor pa oni moraju biti dovoljno vitki da ne smanje stupanj djelovanja aperture i ne povećavaju temperaturu šuma. Tipičan predstavnik ove vrste antena su antene zemaljskih stanica Fucino ili Raisting (slika 6.10). Raisting ima, pri tome, napajanje preko horn-parabolskog uzbuđivača (slika 6.11). Jedan pregled tipova koji su praktički mogući, i uglavnom su derivacije spomenutih, s izmaknutim uzbuđivačem ili pomoćnim reflektorom (offset-tipovi), dan je u (26). Cilj izmicanja je oslobođenje aperture od zapreka i povećanje stupnja djelovanja antene.

Kao posebna prednost sistema Cassegrain navodi se mogućnost smanjenja rasipanja (»spill-over«), tj. »prelijevanja« isijavanja na primarnom i pomoćnom reflektoru, a jedno i drugo znači mogućnost smanjenja temperature šuma antene. Prvo rasipanje dolazi od primarnog izvora ako mu je karakteristika takova da isijava preko ruba pomoćnog reflektora — S_1 sa slike 6.12.* For-

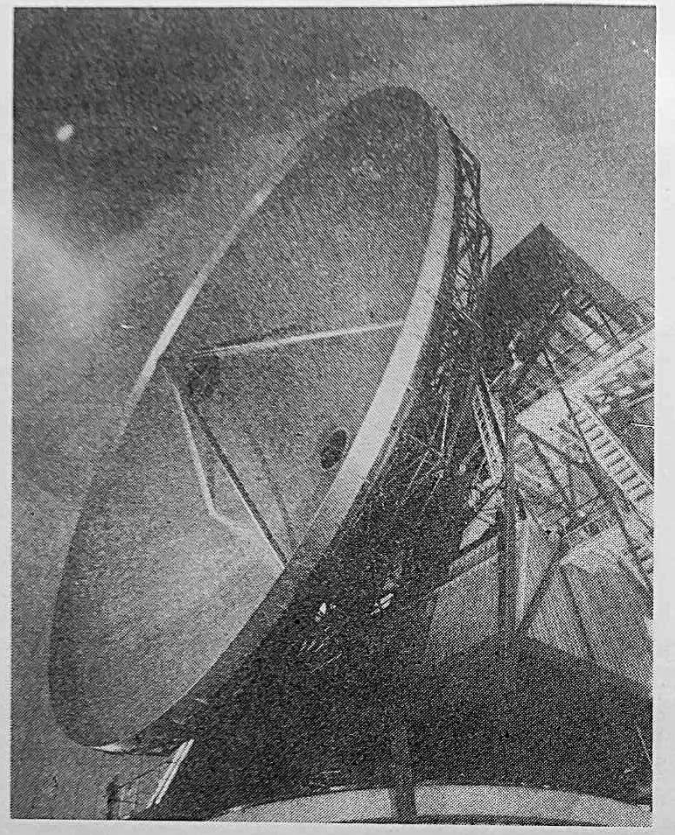
* Sa slike se vidi da jedno i drugo rasipanje znači gledanje na »toplu« okolinu: S_1 kod malenih kuteva a S_2 u svakom slučaju.



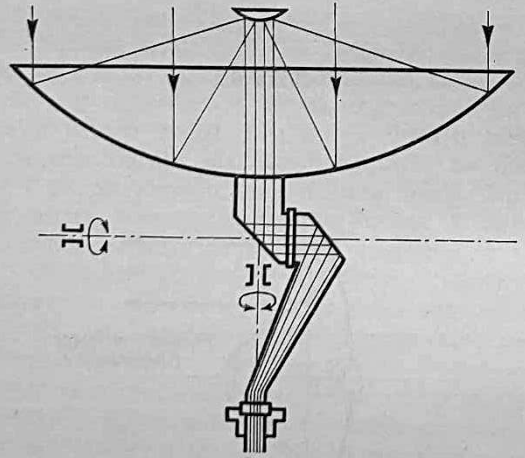
Slika 6.8



Sl. 6.9



Slika 6.10

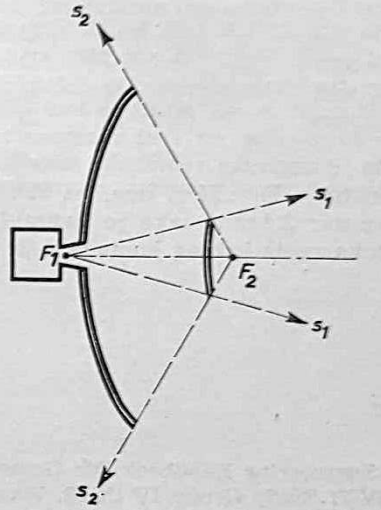


Slika 6.11

miranjem uzbudnog sistema tako da mu karakteristika isijavanja bude dovoljno strma, može se smanjiti S_1. Isto vrijedi i za pomoćni reflektor čime se smanjuje S_2. U cilju poboljšanja karakteristika antena u ovom smislu, posvećuje se vrlo

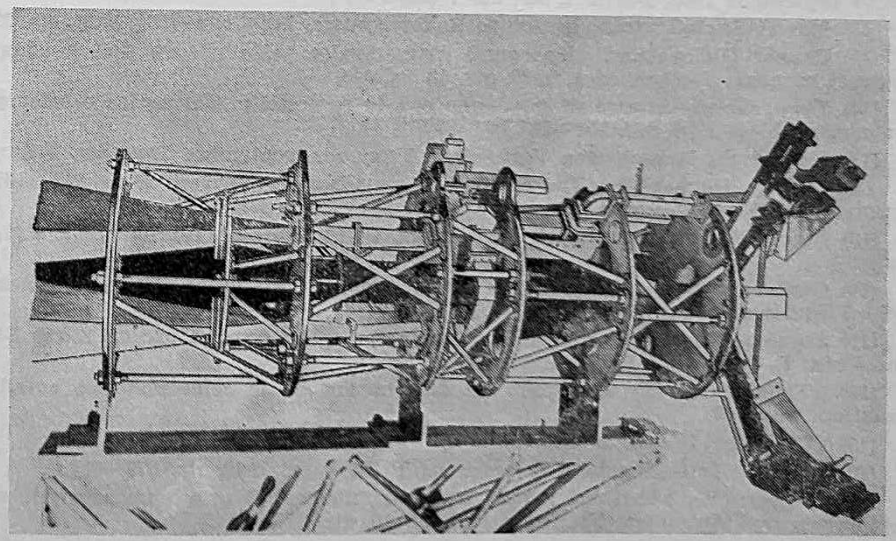
velika briga konstrukciji uzbudnog sistema koji je sada redovito složen (vidi sliku 6.13) (27), (28).

Ove brige otpadaju u principu kod antena u obliku roga, jer se propagacija vrši unutar zatvorenog prostora a prijemnik se, kako smo rekli, može smjestiti u ušće roga. Da ove prednosti ne bi došle u pitanje, potrebno je da



Slika 6.12

unutarnje stjenke roga budu iz materijala koji savršeno reflektira i da budu adekvatno obrađene, što dakako nije tako malen problem kad uzmemo u obzir dimenzije antena.



Slika 6.13

Kad je riječ o obradi površine, navedimo još da je ona i kod ostalih, paraboloidnih površina neobična važna. Pogreške u obradi površine manifestiraju se kao smanjenje dobitka. Ako je kvadratična srednja vrijednost odstupanja od površine idealnog paraboloida n, onda je za realizaciju dobitka od 58 db, uz faktor iskorištavanja aperture 0,65, za frekvenciju 4,2 GHz, potrebno imati promjer aperture kako slijedi:

n = 0	D = 22,6 m
n = 1,6 mm	D = 23,7 m
n = 2,3 mm	D = 24,5 m
n = 3,4 mm	D = 27,2 m

Napomenimo također da je engleska zemaljska stanica Goonhilly I opskrbljena antenom kod koje reflektor s D = 26 m ima, na 99% površine odstupanje od idealnog paraboloida unutar 2,4 mm, iako je napravljen od centralnog dijela promjera 9 m, koji je tokaren iz jednog komada, i 24 latice.

LITERATURA

(1) *Jasik:* Antenna Engineering Handbook, Mc Graw-Hill 1961. str. 2—14.

(2) CCIR Rep. N° IV/57 Study Group IV CCIR, Washington 1962.

(3) CCIR Rep. N° V/23 Study Group V CCIR, Geneve 1962.

(4) Documents de la XI° Assemblée Pleniere, Vol IV/2, Geneve 1967, str. 413 i dalje.

(5) *Trentini et al.:* Dimensionierung und el. Eigenschaften der Erdfunkstelle Raisting, Frequenz 12, 1965, str. 402 i dalje.

(6) Documents de la XI° Assemblée Pleniere Vol IV/2, Geneve 1967, str. 420

(7) Conclusions de la Reunion Interimaire de la Commission d'etudes IV CCIR, Geneve septembar 1968, Partie 1, str. 265 i dalje.

(8) *Morril, Skolnik:* Introduction to Radar System, Mc Graw-Hill, 1962, str. 370.

(9) *Bruno:* Utilizzazioni di sorgenti extraterestre nella misura dell guadagno di grandi antenne, Elettronica 1, 1966, str. 13 i dalje.

(10) *Tirro, Grego:* Misure di guadagno con le radiostelle Elettronica e telecommunicazioni, N° 5, 1969, str. 158—165.

(11) *Holzwarth:* Rauscharme Verstärker, Froquenz, septembar 1962, str. 317.

(12) *Becher, Hachenberg:* Die Bedeutung rauscharmer Vorverstärker für radioastronomische Beobachtungen, Frequenz, septembar 1962, str. 318.

(13) *Rowland, Cott:* Parametric Amplifiers, Point to Point, februar 1962, str. 24 i dalje.

(14) *Garbrecht et al.:* Tiefgekühlte Parametrische Verstärker, Nachrichtentechnische Fachberichte, Bd 32 1967, str. 62 i dalje.

(15) *Scanlan:* Cooled parametric amplifiers for space communication Earth Stations, Point to Point, juli 1969, str. 175—181.

(16) UER Com T (N) 8: Reseau de distribution de la television par satellite geostationaire, 1967.

(17) CCIR Doc IV/295, juni 1969.

(18) *Dimond:* Interplanetary Telemetring PIRE, april 1960, str. 679—685.

(19) *Mezger:* Ein Verfahren zur Messung kleiner Rauschtemperaturen von Empfängern und Antennen, Frequenz 1962, N° 10, str. 375—381.

(20) *Caldecot, Peake:* Designing Low-noise antennas, Electronics 20. januar 1961, str. 60—65.

(21) *Huber:* Antennen und Antennenanlagen für den Empfang der Signale künslicher Erdsatelliten, R. S. Miteilungen 18, 1964. str. 131.

(22) *Stanesby:* Special contribution of G. B. to the design of civil communication — satelite earth station, UN Conference on the Exploration and Peaceful uses of Outer Space, doc A/conf 34/I. 7, 1968.

(23) *Trentini:* Antennen von Boden stationen ..., Nachrichtentechnische Fachberichte Bd 32, 1967, str. 23 do 33.

(24) *Fournier, Chavance:* Importance des antennes froides pour telecommunications spatiales, Revue Technique CFTH 36, 1963, str. 43 i dalje.

(25) CCIR Doc IV/458, 2. X 1969, str. 4.

(26) *Bryant:* The optimisation of antenna electrical performance, UN conf. on the Exploration and Poaceful uses of Outer Space, Wien 1968.

(27) *Foldes et al.:* A Cassegrain feed for wide-band satellite communications, RCA Review, septembar 1965, str. 369—399.

(28) *Potter:* Unique feed-system improves Space Antennas, Electronics, 22. june 1962, str. 76 i dalje.

7.

Tehnološki problemi

Usprkos — može se mirne duše reći — eksplozivnog razvoja satelitske tehnike općenito, a i one koja se odnosi na komunikacione satelite posebno, ostaje još niz problema tehnološke naravi, koje je potrebno riješiti, posebice kad su u pitanju veći sateliti, na primjer, sateliti za radiodifuzne službe. Za dio ovih problema potrebno je tek stvoriti most koji bi povezao poznatu »zemaljsku« tehnologiju s potrebnom svemirskom, vodeći računa o svemirskim uvjetima karakteriziranim vakuumom, ekstremnim temperaturama i njihovim naglim promjenama te raznim radijacijama — faktorima koji se od onih na Zemlji bitno razlikuju. Od kolike su važnosti i zamaha ovi problemi pokazuje, između ostalog i činjenica da se u programu NASA-e — ATS — vrši, uz ogromne izdatke, niz ispitivanja u prostoru kako bi se rezultati tih ispitivanja mogli primjeniti na kasnije operacionalne satelite.

Od čitavog niza tehnoloških problema pogledajmo one koji izgledaju najtipičniji za komunikacione satelite, posebice za obitelj radiodifuznih satelita. Ti bi problemi bili:

— napajanje električkom energijom
— kontrola temperature i odvođenje topline
— antene na satelitima
— rakete vektori

7.1 NAPAJANJE ELEKTRIČKOM ENERGIJOM

Kapaciteti i performanse jednog aktivnog komunikacionog satelita usko su vezani na snagu koju satelit isijava a ova je, očito, direktno vezana na raspoloživu primarnu snagu — snagu napajanja. Jasno je, onda, da su svi mogući izvori energije i sve metode konverzije bili ispitani za primjenu na satelitima i to sa stanovišta maksimalnog sadržaja triju osnovnih svojstava koje takovi izvori moraju posjedovati: pouzdanost, dugotrajnost i visok stupanj djelovanja sveden posebice i na specifičnu težinu i specifični volumen. Sva tri ova svojstva imaju, naime, bitan uticaj na opće karakteristike te funkcionalnost i ekonomičnost jedne satelitske veze. Degradacija ili ispadanje izvora napajanja djeluje direktno na osnovnu funkciju a trajnost izvora vezana je, jednako kao i stupanj djelovanja izvora, na ekonomiku veze zbog skupoće lansiranja

odnosno uske veze između svakog kilograma kojeg je potrebno staviti u orbitu i cijene sistema.

U satelitskoj tehnici mogu se iskorištavati tri kategorije izvora energije: kemijski, nuklearni i solarni i to u različitim formama (1), (2).

Gotovo svi do sada lansirani sateliti i sonde općenito, imali su, kao izvor električke energije, ugrađene solarne baterije s elementima slijedećih karakterističnih parametara: osnovni materijal je monokristalinski silicij, tip ćelija *n* na p, debljina 0,3 do 0,4 mm, spec. otpor 10 ± Ωcm, struja kratkog spoja 145 mA, napon praznog hoda 550 mV, maksimalna snaga jedne ćelije efektivne površine 3,7 cm² 60 mW, stupanj djelovanja 11%. Ovi parametri vrijede uz temperaturu okoline T = 25° C i intenzitet osvjetljenja 140 mW/cm² (to je intenzitet sunčeve energije izvan zemljine atmosfere ako je ravnina ćelije okomita na smjer zraka) (3). Efikasnost ovih ćelija bit će ovisna o kvalitetu prilagođenja spektralne osjetljivosti ćelije na sunčev spektar, a jedna daljnja mjera za povećanje efikasnosti je oblaganje antirefleksivnim slojem koji smanjuje gubitke zbog refleksije na površini. Optimiziranje u daljnjoj mjeri postizava se visinom dotiranja osnovnim materijalom, profilom graničnog sloja, obradom površine, geometrijom strujnih sabirnica (grids) i kontakata. Kao što je gore rečeno, komercijalni stupanj djelovanja iznosi 10 do 11,5% kod 25° C ali je vrlo ovisan o temperaturi.

Usprkos mišljenja koje je vladalo neko vrijeme, razvoj solarnih baterija ide i dalje pa se s njihovom upotrebom računa i kod novih realizacija i sa znatno većim snagama. U tablici I vidimo vrijednosti za veličinu izvora nekih lansiranih ili za lansiranje pripremljenih satelita.

TABLICA I

Intelsat II	izvor 90 W snaga odašiljača	6 W
Intelsat III	izvor 160 W snaga odašiljača	10 W
ATS I	izvor 175 W snaga odašiljača	4 W
ATS III	izvor 175 W snaga odašiljača	12 W
Intelsat IV	izvor 750 W snaga odašiljača	12 × 10 W

U toku su, međutim, studije, projekti i realizacije kod kojih se radi o znatno većim snagama. Evo nekoliko karakterističnih veličina (4):

TABLICA II

Projekt	Nimbus II	Mariner IV	Sert II	Apollo Telescope
Početna snaga (kW)	0,5	0,6	1,5	11,2
Ukupna površina (m²)	4,5	6,3	16,92	135,81
Ukupna težina (kg)	33,6	34	188,6	1 687
Odnos snaga/površina (W/m²)	111	95,2	88,7	82,5
Odnos snaga/težina (W/kg)	14,9	17,66	7,96	6,64

Vidi se, da s rastućom snagom pada dosta brzo specifična snaga (W/kg). Iako za ovo ima razloga vezanih i na svrhe za koje su pojedine solarne baterije građene, sigurno je da će za velike snage, koje bi bile potrebne za velike radiodifuzne satelite, daljnji napredak tehnologije biti neophodan. On, vrlo vjerojatno, neće biti u nekom neočekivanom proboju performansa solarnih ćelija koje poznajemo danas, nego, vjerojatno, redukcija u težini konstrukcije nosioca

ćelije i ćelija samih. U USA radi se na nekoliko programa koji imaju za ciljeve vrijednosti iz tablice III, tj. 48,2 do 82,7 W/kg i snage do 47 kW (4).

TABLICA III

Projekt	Hughes fisica	G. E. Rollup	Boeing NASA	Eos Rigid Panel
Početna snaga (kW)	1,6	10,8	47,0	10,5
Ukupna površina (m²)	15,84	90	450	120,6
Ukupna težina	33,2	136	952	127
Odnos snaga/površina (W/m²)	101	111	104,6	87
Odnos snaga/težina (W/kg)	48,2	73,6	49,4	82,7

Rad na ovim projektima napreduje vrlo dobro i ima ozbiljnih razloga vjerovanju da bi realizacije do 10 kW mogle biti na raspolaganju do 1975.

Na smanjenje specifične težine solarnih baterija utiče se danas u dva smjera: elementi i nosači.

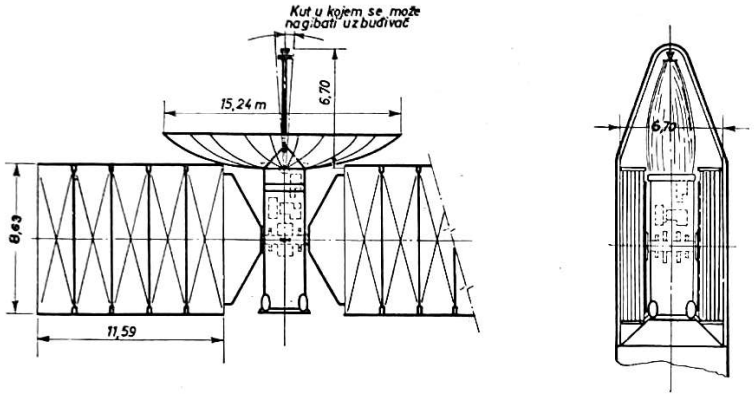
Osim na već klasičnim Si-ćelijama, radi se danas vrlo intenzivno na tankoslojnim ćelijama koje se od konvencionalnih razlikuju polikristalinskom građom, znatno su tanje (20 do 50 μ) i fleksibilnošću a dadu se izraditi i kao veće jedinice (10 × 10 cm). Za satelitsku primjenu ova su svojstva, dakako, vrlo značajna. Osim pouzdanosti, malene osjetljivosti na zračenja (pokusi vršeni kroz 105 dana s tokom od 1 MeV energije i gustoćom od 10^{15} elektrona/cm², pokazali su degradaciju ćelija od samo 5% dok je gubitak snage kod klasičnih ćelija bio 50%), fleksibilitet i manja težina svojstva su ovih novih ćelija kojima je bazni materijal CdS (kadmijev sulfid). Stupanj djelovanja ćelija je 3—5% a rad na njegovom poboljšanju osnovni je razvojni zadatak vezan na ove ćelije.

Kod razvoja solarnih baterija za veće i velike snage potrebno je, kako smo rekli, tražiti i nova mehanička rješenja koja će, uz malenu težinu, omogućiti razvijanje vrlo velikih potrebnih površina, po dolasku satelita u orbitu. Broj elemenata i površina baterija prelaze kod većih snaga mogućnost smještaja na oplošje satelita, a često je i što bolja iskoristivost razlogom da se ćelije montiraju na krila koja mogu mijenjati orijentaciju i postavljati se u položaj prema Suncu koji je najpovoljniji. Novi izvori moraju biti ne samo lagani, nego moraju također zauzimati što manji prostor kod uskladištenja prilikom lansiranja i dovođenja u orbitu, i uz veće površine. Mehanička rješenja išla su ovdje u dva smjera:

— složivi pojedinačni elementi koji se preklapaju,
— neprekidni niz elemenata koji, dok su uskladišteni, u vrijeme lansiranja tvore ovoj oko cilindričkog nosača.

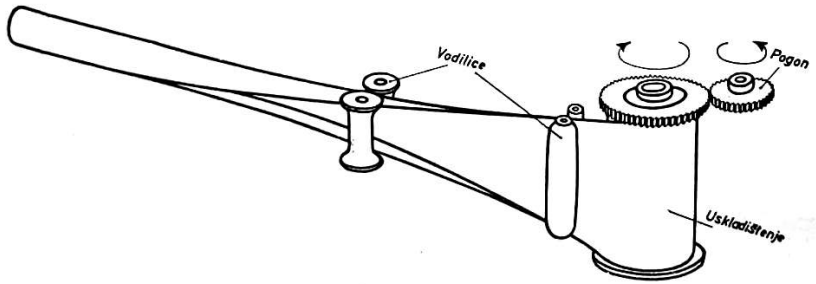
Prva izvedba sastoji se iz okvira vezanih međusobno zglobasto i složenih u obliku harmonike. U okvire su napeti nosioci iz sintetičkih masa koje nose solarne ćelije. Primjer ovakve izvedbe vidimo na sl. 7.1.1 (5). Kod druge izvedbe nosač je neprekinut i učvršćen nosivom konstrukcijom koja se skupa s nosačem ovija oko cilindričkog nosioca. Potrebni skladišni prostor može za vrijeme lansiranja biti znatno manji. Nosiva je konstrukcija u ovom slučaju posebno interesantna jer dozvoljava vrlo velike dimenzije. Radi se uglavnom

na tri tipa: škarasta rešetka, teleskopska cijev i tzv. STEM sistem (Stirable Tube Extendable Member). Ovaj zadnji sistem, ima znatne prednosti pred ostalima i ispitan je već u Svemiru (na Exploreru 38 jedan STEM elemenat bio je izvučen na duljinu od 229 m!). Slični štapovi upotrebljavaju se, u osta-



Slika 7.1.1

lom, i kao štapovi kod stabilizacije satelita gravitacionom gradientom (vidi poglavlje 5). STEM se u stvari sastoji od pernih vrpci koje su prenapete tako da se formiraju u cijevi kad se opruže. Na taj način imaju krutost cijevi, laganu mogućnost namatanja svojstvenu perima te malenu težinu i volumen uskladištenja (sl. 7.1.2) (6). Jedan pano koji bi se odmotao na ovaj način trebao je biti lansiran 1970. Uz snagu od 1 kW on je trebao omogućiti skupljanje iskustava koja bi poslužila za verifikaciju i poboljšanje računa dinamike te realizaciju slične konstrukcije za snagu 12 kW, namijenjene satelitima planiranim za 1975.



Slika 7.1.2

U vezi s opskrbom strujom, solarnim baterijama pojavljuje se i pitanje konverzije energije solarnih baterija, tj. njezino pretvaranje u stabiliziranu energiju uz napon upotrebljiv za pojedine podsisteme.

Sadašnji sateliti s većinom modula u poluvodičkoj tehnici rade s konverterima uz niske napone i dobar stupanj djelovanja pa nema nikakvih tehničkih poteškoća u ekstrapolaciji ovih konvertera za poluvodičke module s većim i velikim snagama.

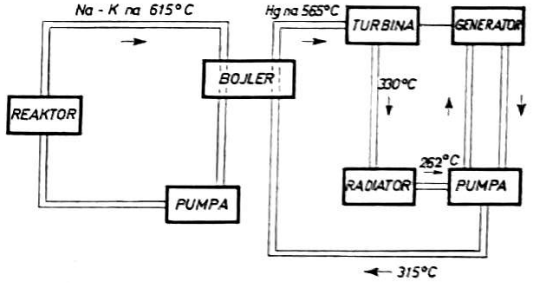
Za satelite koji rade s elektronkama (većinom TWT) daju konverteri uz snage do 100 W napone do 3,5 kV. Radiodifuzni sateliti radit će s elektronkama koje trebaju snage od 10 kW i više.

Prema (7) masa radiodifuznog satelita, kao funkcija električke energije koju daju solarne baterije (ovdje su uključeni i uređaji za konverziju), može se izvesti iz slijedećeg aproksimativnog odnosa, neovisnog o frekvenciji

$$M\,(kg) \cong 250 + 110\,p_0$$

gdje je p_0 snaga u kW koju daju solarne baterije.

Već se danas može predvidjeti da će, osim satelitske radiodifuzije, niz specijalnih zadataka i misija tražiti snage iznad onih koje se danas očekuju od solarnih baterija ili će karakter misije biti takav da se solarne baterije — na primjer, zbog malenog intenziteta svjetla — neće moći upotrebiti. Za sve ove slučajeve ostaje, prema današnjem saznanju, kao najbolji kompromis snaga: težina, rješenje koje se bazira na primjeni nuklearne energije. Neovisno o tome u kome će obliku definitivna rješenja biti dana, izgleda da ćemo se u svakom od njih susretati s četiri osnovne komponente: izvor energije (reaktor), sistem konverzije, radiator-mjenjač topline, oklop (sl. 7.1.3). Kao konverzioni sistemi spominju se danas turbinski sistemi sa zatvorenim kruženjem metalnih para, termoelektrički pretvarači i magnetski hidrodinamički pretvarači. U prva tri sistema je izvor energije, atomski reaktor, izvor topline od kojeg se traži vrlo veliko specifično opterećenje uz vrlo visoke temperature. I u četvrtom sistemu je toplina posredni izvor energije.



Slika 7.1.3

Nekoliko tipova generatora koji iskorištavaju radioizotopno gorivo već je napravljeno i testirano a jedan od njih bio je lansiran sredinom 1961. na satelitu TRANSIT 4A (navigacioni satelit). Taj generator bio je prvi lansirani iz serije SNAP* (snaga 2,7 W uz napon 3 V, predviđeno trajanje uz konstantnu snagu 5 godina i težina nešto iznad 2 kg). Od generatora iz serije SNAP niz je bio koncipiran kao termoelektrički:

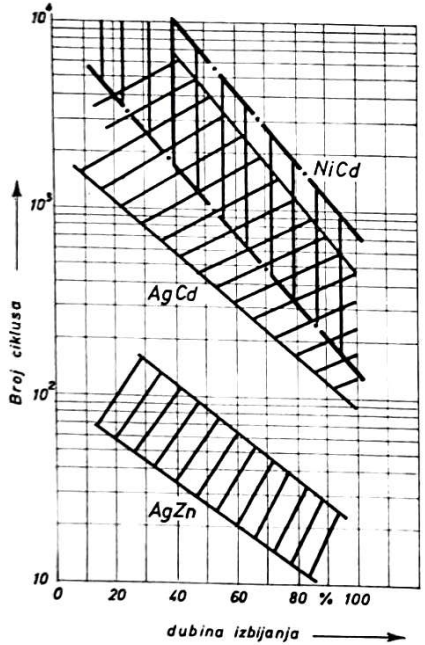
SNAP 3	sa snagom	5 W	težinom	2,5 kg	i gorivom	polonij
SNAP 9	sa snagom	15 W	težinom	45 kg	i gorivom	plutonij
SNAP 19	sa snagom	25 W	težinom	13,5 kg	i gorivom	plutonij
SNAP 27	sa snagom	50 W	težinom	30 kg	i gorivom	plutonij
SNAP 29	sa snagom	500 W	težinom	125 kg	i gorivom	polonij

* SNAP = System for Nuclear Auxiliari Power.

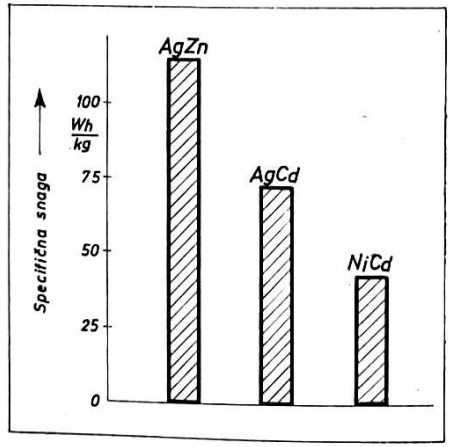
U 1964. ispitan je u Sovjetskom Savezu generator »Romaška« za satelitske svrhe sa snagom 500 W.

Drugi niz koncipiran je za rad s rotirajućim agregatima, dakle s turboagregatima, za snage 2—10 kW i više. U razvoju i realizaciji su jedinice tipa SNAP 2 (3—5 kW), SNAP 8 (35—50 kW) i SNAP 50 (300—1000 kW) sa specifičnom težinom od 0,05 do 0,01 kg/W (8).

Vrlo kompaktni, lagani i o sunčevoj svjetlosti neovisni generatori na nuklearnoj bazi moraju se, međutim, vrlo pažljivo upotrebljavati. Na manjim visinama, razaranje satelita odnosno reaktora, može dovesti do zagađenja atmosfere pa će ovakvi izvori, u principu, biti — u prvom redu — pogodni za stacionarne satelite. Kod upotrebe nuklearnih izvora potrebna je, uostalom, trajna zaštita od radijacija i u normalnom radu. Neki od mogućih upotrebljivih izotopa isijavaju α a neki β zračenja; ova posljednja traže zaštitne mjere. Za energetske izvore upotrebljavaju se oni iz prve skupine (plutonij 238, polonij 210 i curium 244). Zaštita se inače mora odnositi na sve uređaje na satelitu. Za sada se, uostalom, niti ne pokazuje potreba za većim snagama, barem kod komunikacionih satelita u užem smislu, na visinama manjim od sinhrone.



Slika 7.1.4



Slika 7.1.5

Među izvorima energije spominju se i »gorivne« baterije ili elementi. Princip njihova rada baziran je na fenomenu inverznom elektrolizi: mjesto dekompozicije vode na vodik i kisik primjenom električke struje, polazi se ovdje od komponenata koje kombinirane daju vodu i struju (9). Ovaj princip je poznat više od 100 godina ali je primjena stara tek nešto preko deset godina. Već prema temperaturi rada i prirodi upotrebljenog goriva razlikujemo nekoliko tipova baterija. Usprkos niza dobrih svojstava izgleda da za komunikacione

satelite ne dolaze u obzir zbog relativno velike težine. Za 50 W i rad od jedne godine potrebno je oko 150 kg goriva (vodik i kisik). Upotrebljeni su, međutim, kao parcijalni izvori u akcijama Gemini a posebice u akcijama Apollo (sjetimo se jedva izbjegnute katastrofe s Appolom 13 zbog eksplozije rezervoara s kisikom).

Kod satelita općenito, pa i kod komunikacionih satelita pokazuje se trajno potreba izvora koji će davati električku energiju u okolnostima koje nisu normalne radne okolnosti. Za komunikacione satelite bit će to vrijeme kad satelit ima »pomračenje Sunca«. Izvori za ove svrhe bit će izgleda, i u daljnjoj budućnosti akumulatori elektrokemijskog tipa: srebro-zink, srebro-kadmium, nikel-kadmium. Uz pitanje akumulatora samih postavlja se i pitanje regulacije i kontrole punjenja i pražnjenja. Iskorištavanju akumulatora treba posvetiti posebnu brigu jer je broj ciklusa punjenje-pražnjenje ograničen. Na slikama 7.1.4 i 7.1.5 vidimo odnos broja ciklusa prema dubini izbijanja, odnosno specifičnu snagu pojedinih tipova akumulatora. Srebro-kadmium predstavlja dobru sredinu između obje važne karakteristike što je i razlog čestoj upotrebi ovog tipa.

Završimo ovo poglavlje o izvorima pregledom razvoja kako ga predviđa (10):

Sistem	Vjerojatna snaga u kW				
	0,01—2,0	2,0—10	10—25	25—50	50
Solarne ćelije	1966—67	1967—68	1968—69	1969—70	
Termoelektrički izvori s izotopima	1966—67				
Izotopni izvori tipa Brayton		1970—72			
Termoelektrički reaktori			1969—71		
Reaktori Rankin				1972—74	1976—80
Termoionski reaktor					1976—80

LITERATURA

(1) *P. Guillot:* Sources d'energie utilisables en telecommunications, Journal des telecommunication, Vol 35 — X 1968, str. 533 do 543.

(2) *M. Brady:* Spacecraft Technology for Satellite Systems, Electrical Communications, Vol 39 — I 1964, str. 144—154.

(3) AEG — Telefunken: Raumfahrttechnik, str. 8—14.

(4) Doc A/AC 105/51, UN Committee on the peaceful uses of Outer space, 26. II 1969.

(5) *J. D. Kiesling:* Spaceborne transmitter for direct color television transmission from satellites, IEEE transactions, volume BTR-12, N° 2, maj 1969, str. 73—78.

(6) *Mar. Garret:* Mechanical Design and Dynamics of the Alouette Spacecraft, PIRE juni 1969, str. 882 i dalje.

(7) CCIR Doc IV/458. 1969.

(8) *Radebold:* Nukleare Energie Versorgung für die Raumfahrt mit Flüssigmetall — MHD — Wandler als analogon zu SNAP 8 und SNAP 50, Nachrichtentechnische Fachberichte, Bd 32. 1967, str. 119.

(9) *J. Lončar:* Nove električke naprave s direktnim konverzijama energije, Elektrotehnika br. 1, 1969, str. 25—50.

(10) CCIR Conclusion de la Reunion Interimaire de la Commission d' etudes IV. Geneve 1968, Partie I str. 110.

7.2. KONTROLA TEMPERATURE I ODVOĐENJE TOPLINE

Ono što će određivati veličinu i forme jednog komunikacionog satelita neće biti samo sadržaj kućišta satelita, način na koji se rješava korekciona propulzija, veličina i oblik antene ili antena i njezine veze s odgovarajućim prijemnim i odašiljačkim dijelom satelita, način razvijanja, veličina i eventualna mogućnost orijentiranja solarnih baterija — iako se i tu radi o faktorima koji će uticati na oblik i veličinu. Ne manje važan uticaj imat će na oblik i veličinu rješavanje problema vezanih na ponašanje satelita u prostoru a to znači na potrebnu toplinsku i električku izolaciju uređaja, odnosno cjeline koja radi u vrlo razrijeđenom mediumu. Pri tome, zbog cijene i poteškoća vezanih na dizanje u orbitu svakog suvišnog kilograma, rješenje mora biti satelit toliko lagan, kolikogod je to moguće. Jedan od faktora koji utiču pozitivno je činjenica da nosive strukture moraju biti čvrste samo toliko koliko je potrebno da izdrže napore lansiranja, jer poslije rade, uglavnom, u »beztežinskom« prostoru, pa nisu opterećene sadržajem. S druge strane, kod ovih satelita ne postavlja se pitanje — barem za sada — vraćanja na Zemlju, pa zaštita mora zadovoljiti samo uvjete što ih postavljaju ugrađene električke komponente.* U zamjenu za to postoji, međutim, toplinski gradijent nepoznat na Zemlji, uvjetovan razlikama u temperaturi između osvjetljenog dijela satelita i onog u sjeni.

Oblici samih satelita koji su do sada lansirani vrlo su raznoliki: od kugle (COURIER) ili modificirane kugle (TELSTAR, LUNA IB, PIONEER 5), toroida (PIONEER 1, ALOUETTE), višestranih prizni (EXPLORER 2, OGO, DAO, RELAY) pa do kombinacija (EXPLORER 10, NIMBUS, ARIEL) i otvorenih rešetkastih konstrukcija (RANGER I).

Savladavanje problema kontrole temperature jedan je od ozbiljnijih tehnoloških zadataka koji se pojavljuju. Pri tome se pojavljuje nekoliko pitanja paralelno.

Temperatura koju bi u komunikacionom satelitu trebalo osigurati i održavati morala bi biti ona koja najbolje odgovara komponentama i subsistemima koji su upotrebljeni. Održavanje temperature od kakvih 20° C do 40° C stvara

* Ne treba, dakako, misliti da su opterećenja (udarci, ubrzanja, akustička opterećenja) prilikom lansiranja i odvajanja, neznatna. Specifikacije odnosno propisi postavljaju u tom pogledu na materijal vrlo velike zahtjeve.

ambijent koji, na izvjestan način, garantira minimalni broj ispadanja zbog grešaka na komponentama a time i očekivanja da će satelit raditi predviđeni broj godina, uvjetovan u biti pouzdanošću rada komponenata. Efektivnost baterija koje su često ugrađene i solarnih ćelija, ovisi također o temperaturi, pa je često ugrađivanje kompliciranijih uređaja za kontrolu temperature, dakle dodatnih tereta, u stvari efektivna ušteda na teretu koji bi morao biti povećan na primjer većim baterijama ili većim solarnim izvorima.

U orbiti, primat će satelit toplinu od Sunca i — ako je u nižim orbitama — od Zemlje, od uređaja koji u njemu rade i čiji su, dosta znatni gubici — toplina. Primljenu toplinu može satelit odavati samo radijacijom, pa se problem kontrole i sastoji, u stvari, u održavanju na određenom nivou ravnotežja između primljene i isijane topline, s ciljem osiguranja optimalne temperature. Pri tome će, principijelno, trebat raditi u dva pravca: u osiguranju vodljivih puteva koji će s jedne strane sprečavati suvišnu koncentraciju topline a s druge u privođenju topline elementima koji je ne proizvode; drugi pravac bit će osiguranje karakteristika vanjskom oplošju takvih da će se stvoriti pravilan odnos između apsorpcije i emisije topline. Ovo posljednje, dakle kontrola apsorpcije i radijacije površine, može se vršiti na dva načina: pasivno i aktivno. U prvom će se raditi o projektiranju vanjskih površina izvršenom tako da se uspostavi pravilan odnos s karakteristikama reflektivnosti svjetla i topline, dok će se kod aktivne kontrole raditi o aktivnoj intervenciji u održavanju konstantne unutrašnje temperature. Naglašava se često da aktivni sistem kontrole ne mora nužno biti kompliciran i da može biti jednako pouzdan kao i pasivni. Neovisno o tome, aktivni sistem bit će ipak dodatno opterećenje u usporedbi s pasivnim.

Do značajnog pojednostavljenja kontrole temperatura može doći ako je iz nekih razloga poželjno imati satelit u fiksnom odnosu prema Suncu, ako dakle ima dijelova satelita koji su stalno u sjeni: oni u tom slučaju mogu biti radiatori topline a ostale površine mogu se izolirati. Ova je tehnika primijenjena na primjer kod satelita OGO.

Dijelovi koji ne tvore kompletnu cjelinu sa satelitom kao antene i solarne ćelije bolje se kontroliraju temperaturno pasivnim načinom. Sloj kvarca ili stakla na koje je deponiran filter može držati temperaturu ćelija ispod one koja bi znatnije pogoršavala funkcioniranje. Za vrijeme ulaska satelita u sjenu Zemlje, drži temperaturu iznad one koja bi mogla škoditi ćelijama, toplina akumulirana u pravilno — termički — dimenzioniranoj nosivoj strukturi ćelija.

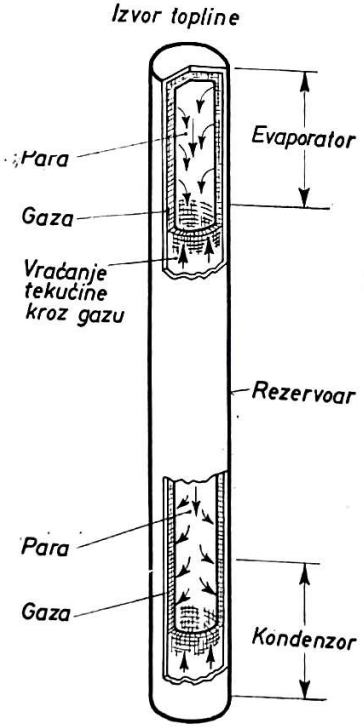
Problemi kontrole temperature odnosno odvođenja topline rastu, dakako, s rastućom prerađenom energijom na satelitu, u prvom redu s rastućom snagom odašiljača, i zbog apsolutne vrijednosti energije disipirane posebice u izlaznom stupnju i zbog potrebe odvođenja topline iz velikih generatora, kad oni prestaju biti solarne ćelije. U ovom području ostaje još mnogo da se uradi pogotovo u prvom pitanju, jer je izbor elektronki još nedefiniran, posebno za veće snage. Za projekte čija se realizacija predviđa u bližoj budućnosti i kod kojih se rad zamišlja s klasičnim tipovima elektronki, predviđa se integriranje anode kao disipativnog elementa u nosivu strukturu satelita, čime bi se osiguralo odvođenje topline. Na sličan način rješavao bi se problem, vjerojatno, i kod većih snaga, ukoliko ne bi došlo do nekih novih ideja u indirektnom hlađenju, koje će veće snage sigurno tražiti. Konstrukcije s radiatorima, ispitane kod generatora iz serije SNAP, rješenja su za generatore,

a moglo bi predstavljati i rješenje za odvođenje topline elektronki velikih odašiljača.

Navedimo i posebno, da će se pri odvođenju topline morat voditi računa i o činjenici da je problem odvođenja kod poluvodiča samo dijelom jednostavniji: niska temperatura na kojoj se rad odvija (350° do 390° K) traži vrlo velike površine za odvođenje. Klasične elektronke s temperaturom od 470° do 500° K traže manju površinu za isijavanje.

Za odvođenje topline kod većih elektronki dano je jedno rješenje u projektu firme RCA lansiranom pod imenom VisTa (Visual-Talking) (1). Za njega je predviđena mehanički modificirana verzija postojećeg tipa elektronke (RCA 6806 ili 8501) koji je normalno hlađen vodom odnosno forsiranim zrakom. Mehanička modifikacija sastojala se je u zamjeni normalnog rashladnog elementa toplinskim radiatorima. Veza s anodom izvršena je kompaktnim bakrenim blokom a iz masivnog bakra je i radiator s eliptičkom konturom s osima cca 1,20 m odnosno 0,75 m, težine cca 15 kg. Izlazni stupanj ima četiri tetrode.

Povećanje snaga vezano je direktno na mogućnosti povećanja radiatora odnosno kapaciteta odvođenja topline odgovarajućim radiatorom koji bi mogao preuzeti na sebe povećanu disipaciju. Situacija se, u ovom smislu, može bitno popraviti primjenom struktura koje imaju vrlo visoku toplinsku vodljivost. Takve su strukture poznate pod imenom »heath pipe«* (Grover) (2) ili »Caloduc« (3). Jedna od mogućih konstrukcija prikazana je shematski na slici 7.2.1 (1).



Slika 7.2.1

* U slobodnom prevodu: toplinska crpka.

Ove strukture su stvarno prenosnici topline, gotovo izotermni na duljinama od nekoliko desetaka centimetara, uz nivoe temperatura koji mogu biti vrlo različni i uz fluksove topline koji mogu biti nekoliko desetaka kW/cm², dakle s kapacitetom nekoliko tisuća puta većim nego što ga ima kompaktni bakreni radiator. Kako se na slici 7.2.1 vidi, radi se u principu o cijevi iz metala ili izolatora koja je s obje strane zatvorena, a uz stjenke ima fitilj iz finog rešetkastog tkiva. Cijev je dijelom ispunjena materijom koja se uz pogonsku temperaturu isparava — to može biti metal ili izolator — a količina mora biti tolika da kapilarni sistem fitilja bude stalno zasićen, čak uz malen višak. Kako će u cijevi, u pogonskom stanju, postojati trajno zasićeno ravnotežje tekućina — para, to je razlika u temperaturi između površina na kojima dolazi do isparavanja i kondenzacije malena (izotermnost). Ogromna prednost ovakvih struktura, osim navedenih gore, leži i u činjenici da su upotrebljive u vrlo širokom području temperatura od onih ispod 0° C do 2.500° C. Pokusi koje je vršila firma RCA pokazali su da se je sa cijevi duljine cca 60 cm (2′) i promjera cca 1,5 cm (5/8″) dalo evakuirati 2,5 kW toplinske energije. Cijev je bila iz molibdena, temperatura na strani izvora topline 1.200° C a razlika u temperaturi svega 5° C. Rezultati su pokazali da se ulazna toplina može predati na vrlo malenoj površini a da se može isijati na vrlo velikoj. Na ovaj način vrlo značajno povećana efikasnost transfera topline, s anode pojačala na toplinski radiator, treba da proširi granice kapaciteta, u pogledu snage odašiljača na satelitu koje su bile postavljene, između ostalog, i konvencionalnim vezama na radiator. Rješenje ovog problema, kako je spomenuto, od izuzetnog je značenja za radiodifuzne satelite većih snaga.

Strukture opisane gore mogu naći primjenu i inače u svim slučajevima kod kojih se na satelitima pojavljuju problemi:

— prenosa toplinske energije na danu točku
— evakuacije toplinske energije s vrućih točaka
— ekvilibriranja temperature u danom sistemu,

a to znači da one mogu pomoći u rješavanju čitavog niza problema vezanih za kontrolu temperature i odvođenje topline na satelitima. Niz karakterističnih primjera dan je u (3).

LITERATURA

(1) *Marsten, Gubin:* System design of a proposed direct-to-home TV Satelite Experiment, RCA Engineer vol. 12 N° 2, 1966, str. 74—79.

(2) *G. M. Grover et al.:* Structure of very high conductance, J. A. P. N° 35, juni 1964, str. 1000—1001.

(3) *Shroff, Armand:* Le Caloduc, Rev. techn. Thomson — CSF, Vol 1, N° 4, decembar 1969, str. 611 do 647.

Niz problema koji se općenito pojavljuju kod antena u spacijalnim sistemima komunikacija bit će karakterističan i za antene na zemaljskim stanicama, dok će neki od njih biti specifični za antene koje su dio komunikacionih satelita.

U općim razmatranjima pitanja antena, vidjeli smo da su neki odnosi općenito, pa prema tome i kod satelitskih antena, određeni — između ostalog — i širinom snopa kod točaka u kojima snaga pada na pol (3 db točke). Kod antena s kružnom aperturom i homogenom iluminacijom aperture, sadržano je unutar konusa koji prostornu karakteristiku isijavanja siječe u kružnici »pol snage«, oko 47,5% snage koja se isijava. Ako smo prostorne odnose odabrali tako da ovaj konus upravo tangira Zemlju, a os mu je usmjerena na središte Zemlje, bit će ostatak snage izgubljen, a najveća gustoća snage bit će u centru pokrivene površine, dok će na rubnom području, već zbog karakteristike isijavanja, uz gornje uvjete pasti na pol. Zbog udaljenosti od satelita do ruba područja, koja je veća od visine satelita, bit će, zahvaljujući većem gušenju kod propagacije, signal i dalje slabljen a razlika će biti to veća što je visina satelita niža. Ovim gubicima pridružit će se dalje i gubici u atmosferi, koji će za rubno područje biti veći zbog duljeg puta kroz atmosferu, kod malih kuteva uz koje se satelit vidi s rubnih područja.

Postoje dva načina da se gubici ove vrste smanje: da se poveća usmjerenost ili da se uzbuđenje aperture izvede tako da dijagram isijavanja dobije formu koja vodi računa o povećanim gubicima i kompenzira ih. Prvo rješenje ne vodi uspjehu jer rubna područja mogu biti još gore riješena, a želja je i potreba da se sve zemaljske stanice nađu u jednakoj situaciji, ako su u području pokrivanja. Razlike mogu postati manje samo ako se snop općenito suzi a to znači ako se smanji područje pokrivanja.

Drugo rješenje traži niz mjera i konstruktivnih zahvata a praktički daje samo približno zadovoljavajuće rezultate. Prostorni dijagram isijavanja koji je u svom centralnom dijelu oblika kaplje, morao bi sada, očito, imati konkavnu kapu. Za slučaj stacionarnog satelita morao bi dijagram primjerice, ako želimo iskoristiti maksimalne mogućnosti, imati pod kutem 8,65° dobitak za 1,32 db veći od onog u osi.

Za određivanje idealne karakteristike odnosno njezino aproksimiranje potrebno je odrediti takozvanu funkciju dijagrama isijavanja, koju možemo definirati kao

$$F(\delta) = \frac{E(\delta)}{E(\delta = 0)}$$

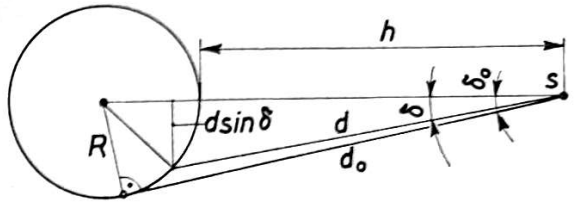
gdje je $E(\delta = 0)$ jakost polja u središtu područja a $E(\delta)$ jakost polja u točki odnosno na kružnici kojoj odgovara kut satelita δ.

Iz slike 7.3.1 je

$$F(\delta) = \frac{d}{h} = \frac{\cos\delta_0 - \sqrt{k^2 - \sin^2\delta}}{1 - k} \qquad (7.3.1)$$

gdje je

$$k = \sin\delta_0 = R/(R + h)$$



Slika 7.3.1

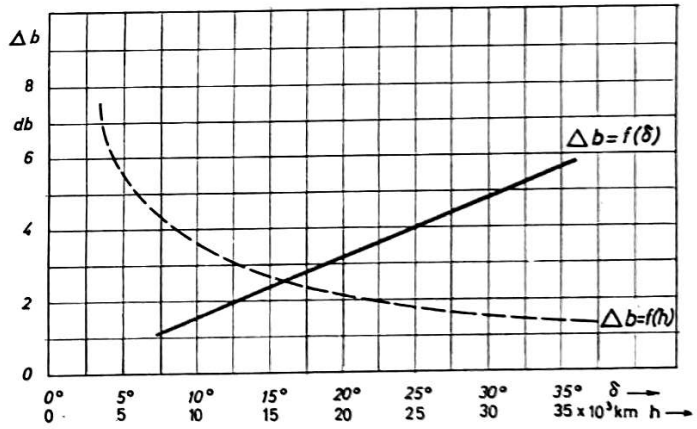
Za $\delta = \delta_0$ prelazi izraz za funkciju dijagrama u

$$F(\delta_0) = \frac{R + h}{h}\cos\delta_0$$

Za ovaj slučaj, i to u obliku

$$F(\delta_0) = \Delta b = 20\log\frac{d}{h} = 20\log\frac{R + h}{h}\cos\delta_0$$

imamo, za razne h odnosno za razne δ_0, odnose prikazane na slici 7.3.2. Za geostacionarni satelit prikazana je vrijednost za Δb kao funkcija kuta δ, koji ovdje znači kutnu udaljenost od središta zone pokrivanja, na slici 7.3.3. Vidimo

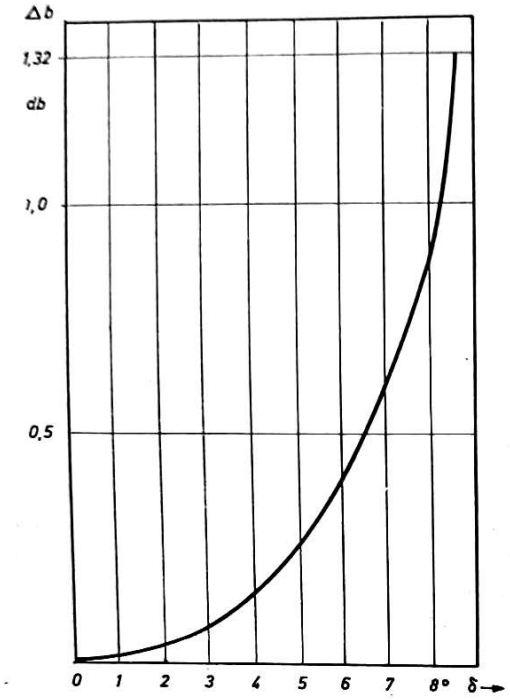


Slika 7.3.2

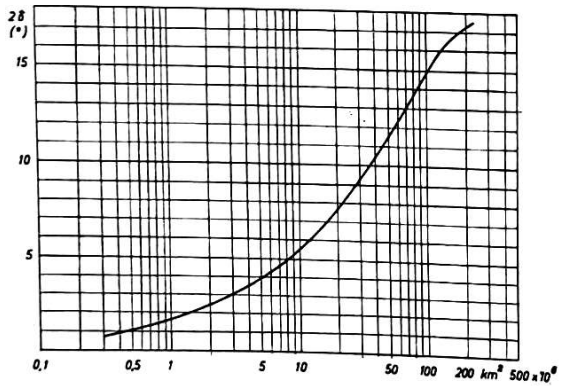
da je kod geostacionarnog satelita, na rubu mogućeg područja, gušenje propagacije, kako smo već rekli, za 1,32 db veće nego u središtu tog područja. Za satelit na visini 5 000 km razlika se penje već na 5,50 db.

Ovisnost površine koja se u idealiziranom slučaju dade pokriti, o kutu δ za stacionarni satelit imamo na slici 7.3.4. Nomogram (slika 7.3.5) izrađen je prema nomogramu iz (1) (odnos dbW/m² — EIRP dan je u nomogramu iz (1)

pogrešno) i pokazuje kompletan odnos između promjera parabole, dobitka za niz diskretnih frekvencija, kuta 2δ, površine koja je pokrivena u km² i — uz danu snagu odašiljača — EIRP te gustoću toka u dbW/m² odnosno jakost polja dbμV/m za geostacionarni satelit.



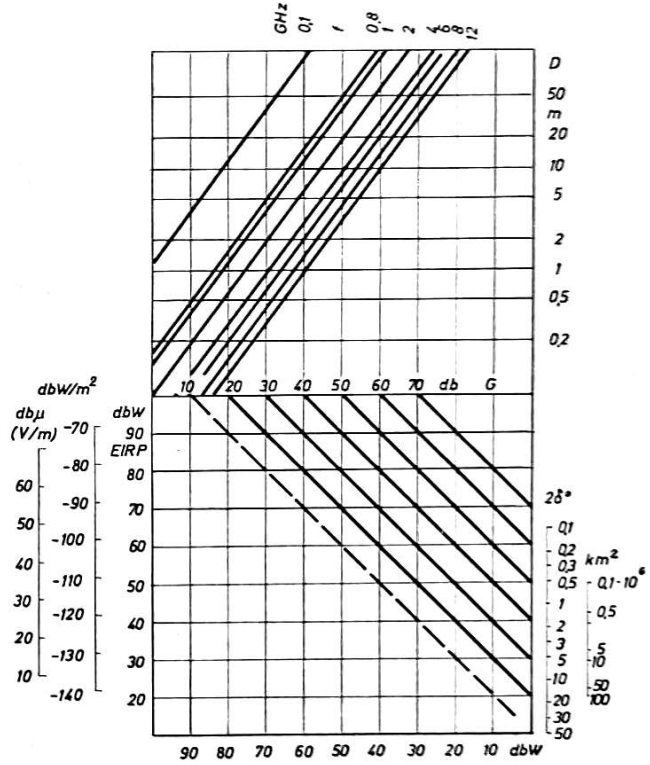
Slika 7.3.3



Slika 7.3.4

Kako ćemo vidjeti kad bude govora o radiodifuznim satelitima, niz razloga govori o malim vjerojatnostima da bi se sve mogućnosti geostacionarnog satelita, u pogledu površine pokrivanja, iskorištavale pa se sve češće misli na

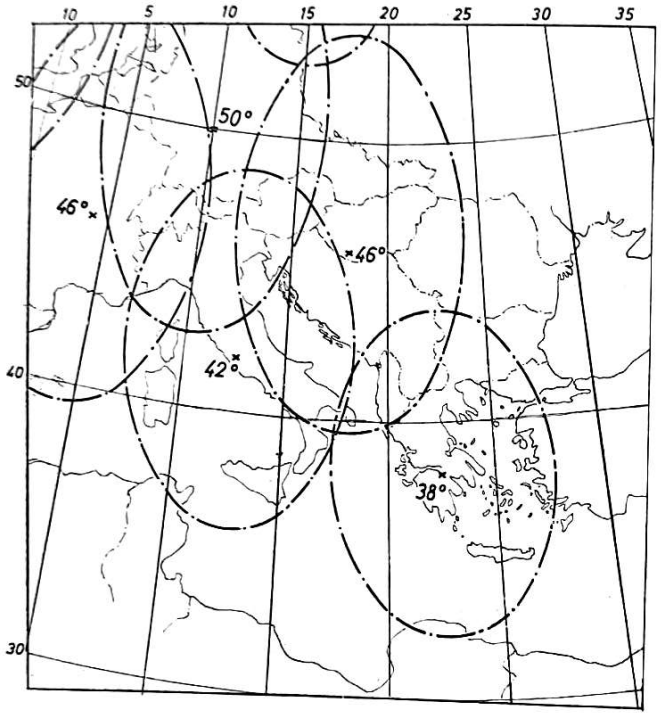
antene s užim snopom, kad su u pitanju ti sateliti, s manjim područjem pokrivanja koje odgovara pojedinim zemljama ili njihovim dijelovima (slika 7.3.6). Ako su površine u pitanju dalje od ekvatora, jasno je da će, uz uobičajene antene, s rotacionim paraboloidom kao reflektorom i uobičajenim načinom uzbuđenja, kontura pokrivene zone na zemljinoj površini biti izdužena elipsoidna linija (slika 7.3.7). Postoji dakako mogućnost da se oblik konture stvarnog pokrivanja približno prilagodi konturi površine koju treba pokriti. Iako do danas kod stacionarnih odnosno sinhronih satelita, nije bilo nekog naročitog uspjeha kod pokusa da se poboljša pokrivanje time da se snopu antene dade specijalno prilagođeni oblik (2), planirani evropski komunikacioni satelit uzima u obzir i antenski sistem koji bi imao otvor 5,5° × 4°. Razlozi iz (2) kao: relativno osrednji kompromis između dimenzija antene i poboljšanja svojstava, kompleksnost antene i povećanje gubitaka vezano na to, a onda — konačno — i širina pojasa za koju se dade postići traženo poboljšanje pokrivanja, ne bi ovdje dolazili do izražaja zbog relativno malenog odstupanja od »neprilagođenih« antena.



Slika 7.3.5

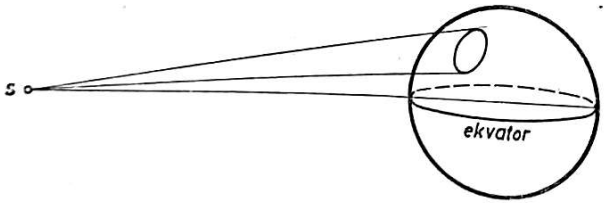
U ovisnosti o veličini i obliku površine koju treba pokriti s jedne, a onda o upotrebljenoj frekvenciji, pa dijelom i o načinu stabilizacije satelita s druge strane, bit će ovisni ne samo veličina nego i oblik odnosno konstrukcija antenskog sistema satelita. Kako je u poglavlju o stabilizaciji (Poglavlje 5) spome-

nuto, jedan od načina stabilizacije satelita je žiroskopska stabilizacija kod koje satelit, u principu, rotira oko osi okomito na ravninu orbite. Prva generacija satelita SYNCOM, kod koje je taj način stabilizacije bio primijenjen, imala je prostornu karakteristiku isijavanja toroidalnog oblika s usmjerenjem samo u ravninu paralelnoj s osi rotacije satelita. Karakteristika isijavanja u ravnini okomitoj na tu os bila je kružna.



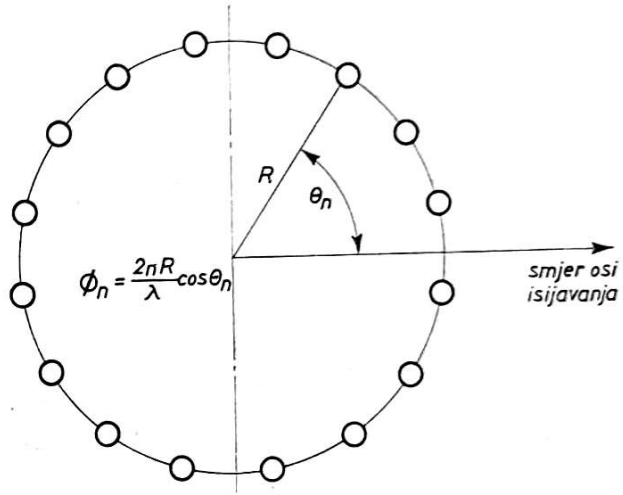
Slika 7.3.6

Za postizavanje užeg odnosno adekvatno oblikovanog snopa i većeg dobitka trebalo je preći na antenske sisteme usmjerene u obje ravnine, a to znači kod žiroskopske stabilizacije, na rješavanje problema prenosa energije na sistem odnosno usmjerenje antene usprkos rotacije satelita.



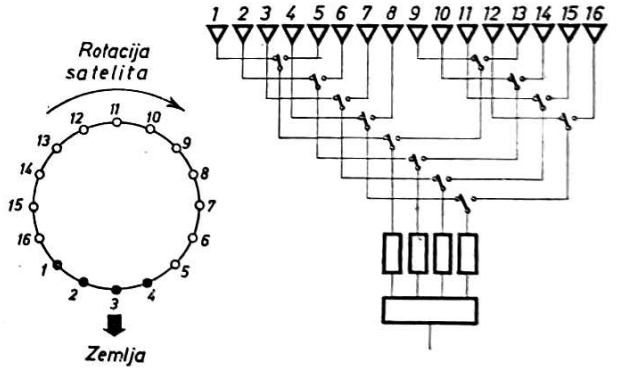
Slika 7.3.7

Zadržavanje smjera osi glavne latice u ovakvim uvjetima može se riješiti bilo mehaničkom bilo električkom proturotacijom,* postizavanjem — dakle — jednog kontinuiranog protusmjernog rotiranja s brzinama usklađenim tako da smjer snopa ostaje nepromijenjen. Za električku proturotaciju dano je do sada više rješenja koja se baziraju na istom principu: radiacioni sistemi ili grupe elementarnih sistema raspoređeni su paralelno s osi rotacije u jednakoj udaljenosti od osi i međusobno jednakoj udaljenosti, a napajaju se tako da je aktivan samo jedan njihov dio koji je upravo okrenut prema Zemlji.



Slika 7.3.8

Firma Hughes dala je rješenje sa sistemom od 16 elemenata raspodijeljenih pravilno po obodu kružnice kojoj je os rotacije žiroskopska os (slika 7.3.8). Ako je za vrijeme rotacije svaki od n elemenata napajan s fazom takovom da je

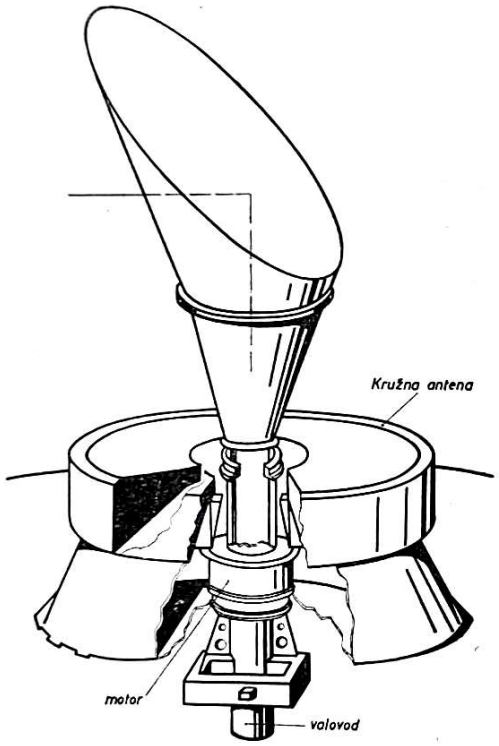


Slika 7.3.9

* Despun-antene, antenne a contre-rotation.

$$\Phi_n = \frac{2\pi R}{\lambda} \cos \Theta_n$$

bit će fronta isijanog vala sistema u ravnini okomitoj na os $\Theta = 0^0$ a smjer snopa bit će, usprkos rotiranja satelita, stacionaran. Promjene faze vrše se feritima s elektronskim upravljanjem (slika 7.3.9) a komandni signali koji nužno vode računa o rotiranju satelita, derivirani su iz referentnog signala kojeg daje jedan solarni senzor. Ugrađeni satni mehanizam vodi računa o promjeni prividnog kuta Sunca i Zemlje a veza za telemjerenje i telekomandu omogućuje također intervenciju kad je ona potrebna.



Slika 7.3.10

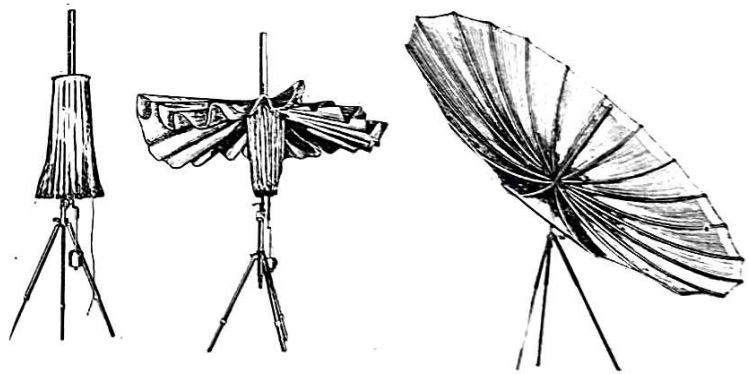
Što se tiče elemenata raspoređenih po periferiji kruga, svaki od njih sastavljen je od linearnog niza elementarnih radiatora, pa je snop direktivan, kako smo rekli, u obje ravnine (o direktivnosti niza elementarnih radiatora vidi (3)). Eksperimentalni model davao je snop s aperturom od oko 20^0 približno u obje ravnine, dobitak iznad 14 db i širinu pojasa oko 200 MHz. Sistem, inače vrlo dobro riješen, predstavlja vrlo kompleksan elektronski sklop, a performanse mu ograničavaju visokofrekventni gubici, posljedica upotrebe krugova za faziranje odnosno komutaciju ili faziranje i komutaciju (2). Kod ovog sistema moguće je zamisliti i razradu signala za defaziranje na Zemlji i njihovo upućivanje na satelit kanalima za telekomande i telemjerenja.

Na sličnom principu izrađeno je i rješenje francuske grupe SMECMA koja daje za frekvencije 3 700—4 200 MHz, 5 925—6 425 MHz i 7 500—8 000 MHz

sisteme s dobitkom $\geq$ 13,5 db sa širinom snopa $18^0 \times 18^0$, odnosno dobitkom $\geq$ 19 db sa širinom snopa $9^0 \times 9^0$. Za pojas 7 600—7 900 MHz predviđa i rješenje s dobitkom 24 db i snopom $3^0 \times 9^0$.

Drugo je rješenje, kao što je rečeno gore, mehanička proturotacija. U težnji da se osigura položaj radiacionog sistema prema Zemlji, sada se mogu naći rješenja koja idu od onoga u kome samo radiacioni sistem — sada sistem usmjeren i bez posebne intervencije kod napajanja, na primjer, parabola ili rog — vrši proturotaciju u skladu s rotacijom satelita, do onog u kome, uz radiacioni sistem rotira također dio uređaja ili uređaj čitav. Rješenje projektirano za satelit tipa INTELSAT III vidimo na slici 7.3.10. Ovakvo će rješenje biti dakako primjenljivo i kod velikih radiodifuznih satelita za koje, međutim, postoje i druga rješenja.

Kad se bude radilo o ovim posljednjima pojavljivat će se i problem druge vrste koji će se odnositi na konstrukciju reflektora radiacionog sistema jer će ovaj, često, trebat imati dosta velike dimenzije, pogotovo za niže frekvencije. Stavljanje u orbitu satelita s ovako velikim radiacionim sistemom ili paraboloidom za usmjeravanje može predstavljati ozbiljan problem. Jasno je da će problem počimati od neke određene veličine parabole: manje će biti u položaju normalnog funkcioniranja već prilikom lansiranja, dok će veće morati biti lansirane u sklopljenom stanju. Granica bi mogla biti negdje oko 3 m promjera. Interesantno rješenje koje mu je cilj da se dimenzije ovog sistema svedu na neznatan iznos, prije ulaska u orbitu — rješenje koje je kao princip bilo ispitano i kod nekih satelita lansiranih u Sovjetskom Savezu, predlaže firma RCA za svoj projekt ViSta, tipičan radiodifuzni satelit. Tu se radi o reflektoru cca 3 m promjera (10′) izrađenom iz mreže vrlo malenih okana, s mogućnošću slaganja, odnosno otvaranja na principu modernih složivih kišobrana* (slika 7.3.11) (4). Na slici 7.3.12 (4) vidimo broj rebara kišobrana



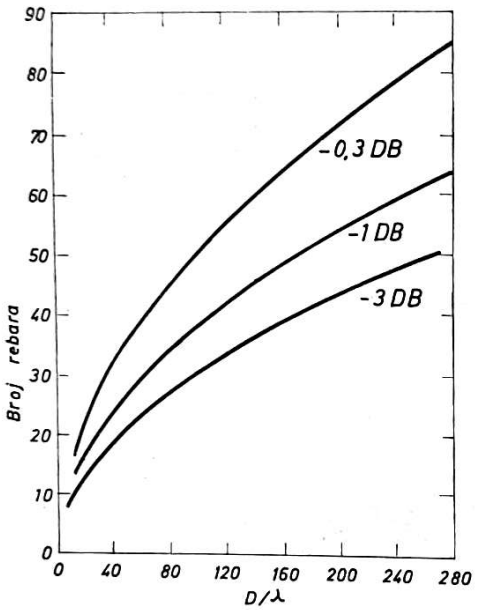
Slika 7.3.11

koja su potrebna da se održi forma paraboloida, kao funkciju promjera reflektora, izraženog u λ, za tri razna smanjenja dobitka antene, koja su uvjetovana odstupanjem od idealnog paraboloida. Kako su rebra najvažniji faktor koji utiče na težinu sistema, potrebno je vrlo oprezno ispitati postizavanje opti-

* Napomenimo usput da je ovaj tip antene bio upotrijebljen i na Mjesecu prilikom prvog iskrcavanja ljudi, za veze i prenos TV-programa.

muma u odnosu smanjenje dobitka — broj rebara (dakle težina). Kod paraboloida o kome je riječ gore, postignuta je specifična težina od 1,2 kg/m² aperture parabole.

Prostor za antenski sistem kod lansiranja dade se uštediti i jednom drugom predloženom konstrukcijom, u kojoj se paraboloid sastoji od latica — dijelova paraboloida a oni su, kao latice cvijeća, »zatvorene« prilikom lansiranja i otvaraju se u paraboloid kad satelit dođe u orbitu (sunflower — antena). Danas se smatra da je moguće staviti u orbitu satelit s antenama promjera do 30 m (dobitak cca 27 db kod 100 MHz ili 45 db kod 800 MHz s odnosnim otvorima snopa od 7° odnosno 1°). Napomenimo i ovdje da velike antene, uz velike solarne baterije, mogu predstavljati ozbiljan problem u vezi sa stabilizacijom položaja. Prihvatljivo rješenje u ovom smislu je kutna preciznost stabilizacije 1/10 otvora glavnog snopa antene.



Slika 7.3.12

Komunikacioni će sateliti, da bi ispunili zadatak relejne stanice i odašiljača na velikoj visini i s velikim dosegom, morat imati, osim emisione antene ili emisionih antena, za osnovne zadatke, također i niz antena ili sistema za tolemetriju ili telekomandu. Za ove posljednje uzimat će se normalno kvazi-izotropne sisteme uz cirkularnu polarizaciju, kako bi se dobivanje podataka i primanje komandi moglo izvršiti i onda kad, usprkos stabilizacije, stabilizacioni sistemi posve zakažu. Često su to helikoidalne antene, ali ni druge kombinacije ili sistemi sličnih karakteristika nisu isključeni (5).

Kao i na ostale elemente iz kojih se komunikacioni satelit sastoji, postavljat će se i na antene za satelite niz zahtjeva koji su kod ostalih antena nepoznati ili su bez značenja: otpornost na vrlo visoke i vrlo niske temperature u vakuumu i kod isijavanja s velikim gustoćama energije, otpornost na

vibracije, malena težina, ekstremno velika pouzdanost, naponska čvrstoća kod niskog pritiska, malene dimenzije i sl. Napomenimo da je problem naponske čvrstoće zajednički i ostalim elementima vezanim na radiacioni sistem (valovodi, dijelovi odašiljača i sl.) (6).

LITERATURA

(1) CCIR Doc IV/360 1969.

(2) CCIR Conclusion de la Reunion Interimaire de la Commission d'etudes IV, partie I, Geneve 1968, str. 107.

(3) *Galić:* Opći diagrami isijavanja sistema s tri radiatora, Elektrotehnika, Vol 6, N° 2, 1963.

(4) *Marsten, Gubin:* VisTa — System design of a Proposed Directo-Home TV Satellite Experiment, RCA Engineer, Vol 12, N° 2, august—septembar 1966.

(5) *Hess:* Die Rundstrahlende Wendelantenne als Satelitten-Bordtelemetrie-antenne, Nachrichtenteschnische Fachberichte Bd 32, 1967, str. 96.

(6) *Koob:* Antennen für Raumfluggeräte, NTZ 1965, N° 5, str. 271.

7.4 RAKETE VEKTORI

Ako je dan »satelit« s odašiljačem dovoljne snage ili pretvaračem potrebnog kapaciteta, s adekvatnim antenskim sistemom ili sistemima antena određenih svojstava, onda je pitanje pretvaranja takvog »satelita« u stvarni satelit s praktičkom mogućnošću eksploatacije, bilo da se radi o komunikacionom satelitu u užem smislu ili radiodifuznom satelitu, u prvom redu pitanje lansiranja odnosno dovođenja u traženu orbitu i pravilne orijentacije satelita u njoj.

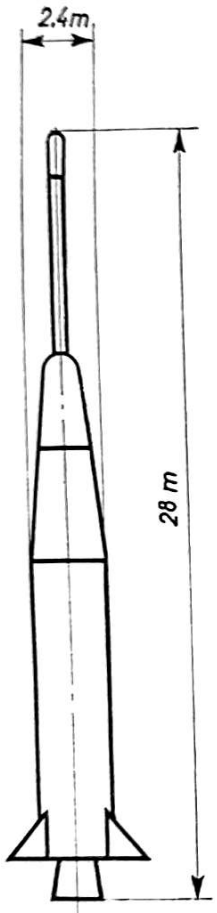
Orijentacija i stabilizacija satelita potrebne su kako je već rečeno, da bi se trajno osiguralo isijavanje u privilegiranom smjeru odnosno pokrivanje odabrane površine na Zemlji. Kakvo je danas stanje tehnike, nema — usprkos kompleksnosti zadatka — problema u njegovom rješavanju koji bi predstavljao nepremostive poteškoće: čitav niz njih rješava se rješenjem problema dovođenja u orbitu dovoljno velikih tereta.

Iako se danas još ne može reći da lansiranje u širem smislu predstavlja proces koji se sa sigurnošću može po volji ponavljati,* možemo s druge strane, mirne duše tvrditi da je tehnika lansiranja svladana. Dovoljno je napomenuti da je do sredine 1965. lansirano preko 1500 satelita i sondi raznih tipova, da je broj satelita lansiranih 1967. iznosio 127, 1968, taj je broj 119 a 1969, uvijek prema podacima iz Telecommunication journal, 110 i 1970 g. 114. Ne zaboravimo konačno da je 21. srpnja 1969. čovjek stavio nogu i na Mjesec a da je tom prilikom kao i u kasnijim akcijama APOLLO raketa tipa Saturn 5 digla teret od 44.676 kg.

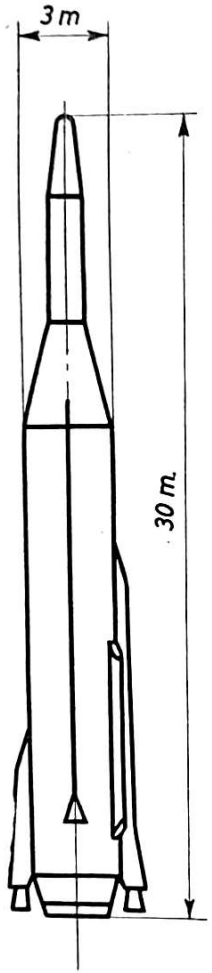
Prvi američki komunikacioni sateliti TELSTAR I, RELAY I i SYNCOM I bili su lansirani raketama Thor Delta, trostepenim raketama s potiskom 75 tona (slika 7.4.1), koje su mogle dignuti u orbitu 500 km teret od 250 kg i koje su se odlikovale velikom pouzdanošću. Ova raketa, kao i slijedeća Thor-Agena

* Vidi neuspjeh dovođenja na određenu poziciju satelita Intelsat III F5.

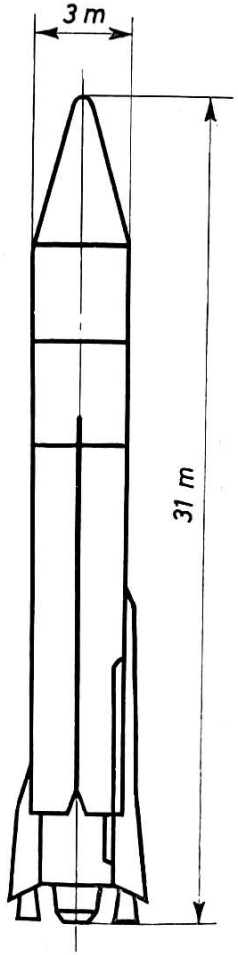
B, nešto jača ali manje pouzdana, omogućavala je lansiranje u niže cirkularne orbite (nekoliko tisuća kilometara maksimum). Eliptičke orbite dozvoljavale su lansiranje i na veće visine: s raketom prvog tipa moglo se je ići na 10 000 km s teretom 55 kg i na 36 000 km s 35 kg. Apogej je pri tome bio 500 km. Za cirkularne orbite 10 000 ili 36 000 km stajala je na raspolaganju raketa tipa Atlas Agena B (slika 7.4.2), dvostepena raketa s potiskom 170 tona ili pouzdanija raketa Atlas Centaur (slika 7.4.3) s dva stepena i potiskom 170 tona i varijanta ove posljednje Titan Agena B sa sličnim performancama.



Slika 7.4.1



Slika 7.4.2



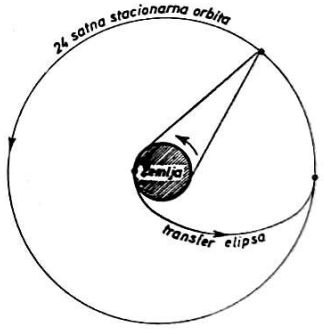
Slika 7.4.3

Atlas-Agena B raketa je koja bi mogla staviti u cirkularnu orbitu visine 500 km teret od 2 500 kg, u cirkularnu orbitu visine 10 000 km 600 kg, ako je lansiranje izvršeno u smjeru zapad-istok iz Cape Kennedy-a ili Woomere, a 450 kg ako se radilo o polarnoj cirkularnoj orbiti. Za orbitu 36 000 km, s lansiranjem u smjeru istok, teret bi bio 150 kg a u protivnom smjeru 35 kg. Za Atlas Centaur imali bi za ekvatorijalne cirkularne orbite teret od 1 350 odnosno

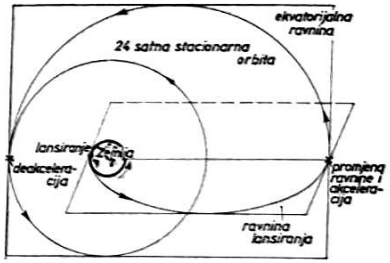
550 kg (za 10 000 odnosno 36 000 km) ili 1 250 kg odnosno 230 kg za polarne orbite visine 10 000 km odnosno 36 000 km (1).

Iz gornjeg vidimo, usput, da je teret koji se dade dići u ekvatorijalnu orbitu znatno veći ako se pri tome iskoristi i brzina rotacije Zemlje u smjeru prema istoku. S druge strane, za ekvatorijalne orbite s visinom 36 000 km, vrijedili bi gornji podaci kad bi baza za lansiranje bila na ekvatoru. Takvih baza, međutim, nema, pa će lansiranje s drugih širina biti ne samo kompleksniji posao nego će iziskivati i veći potrošak goriva.

Ako se na primjer lansiranje vrši s Cape Kennedy-a, a to vrijedi manje-više i za ostale baze: Vanderberg u USA, Woomera u Australiji i Colomb-Bechar u Sahari, bit će ravnina lansirne orbite nagnuta prema ravnini ekvatora za cca 30°, što grubo odgovara širinama baza. Dovođenje u ekvatoralnu orbitu moguće je, dakako, ali je, kako smo rekli, vezano na niz operacija i potrošak goriva koji u zadnjoj liniji znači smanjenje korisnog tereta, dakle i smanjenje moguće korisne snage odnosno kapaciteta satelita. Za stavljanje u stacionarnu orbitu potrebne su najmanje dvije serije dodatnih paljenja a moguća su, u principu dva postupka koje shematski prikazane vidimo na slikama 7.4.4 i 7.4.5 (2). U prvom slučaju prelaz na cirkularnu orbitu vrši se tzv. Hohmannovim transferom odnosno putem Hohmannove transfer elipse, a to znači putem elipse u koju se satelit ubacuje u perigeju a zahvat potreban da se izvrši promjena orbite, odnosno pređe u cirkularnu, vrši se u apogeju koji rezultira. Ova elipsa bit će definirana inicialnom visinom h odnosno geocentričkom udaljenošću $R_g\ (= h + R)$ i visinom apogeja koji je u stvari jednak sinhronoj orbitalnoj visini. Ovdje se posebno iskorištava i činjenica da



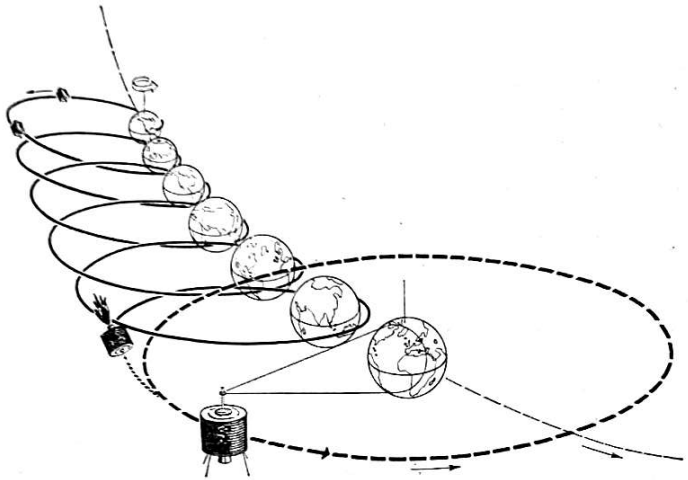
Slika 7.4.4



Slika 7.4.5

se satelit giba sporije u blizini apogeja, visine jednake visini sinhrone orbite, nego u kružnoj orbiti iste visine, a to znači da će se na elemente orbite dati uticati sa znatno manjom silom. Uz pretpostavku da se apogej postigne iznad ekvatora, makar i uz cijenu da se satelit lansira najprije u jednu nižu cirkularnu »parking«-orbitu, finalni zakret u ekvatorijalnu ravninu može se izvršiti istovremenim davanjem satelitu brzine od cca 3,06 km/sek, kojom se satelit giba u cirkularnoj orbiti na sinhronoj visini. Ova konačna operacija može se izvesti zadnjim stupnjem rakete ili propulsionim sredstvima ugrađenim u sami satelit. Ona mogu poslužiti kasnije i za orbitalnu kontrolu.

Drugi način, posebice ekonomičan za baze koje bi se nalazile na većim širinama — iznad 44° — sastoji se u lansiranju satelita u eliptičnu orbitu s apogejom znatno iznad visine stacionarne orbite. Uz ovu visinu, intervencija na orbitu moći će se izvršiti s vrlo malenim utroškom goriva. Intervencija u pogodnom momentu, mijenja ravninu orbite i daje satelitu brzinu potrebnu da u perigeju uđe u stacionarnu orbitu. Ovaj je način ekonomičniji od svakog drugog, ali je uspjeh vezan na niz uvjeta koje treba ispuniti.



Slika 7.4.6

Navedimo, kurioziteta radi, kako je teklo postavljanje u orbitu EARLY BIRD-a. Lansiranje je bilo izvršeno prema istoku a ravnina orbite bila je nagnuta prema ekvatoru za 28,7° (širina Cape Kennedy-a). Kod prelaza preko ekvatora akcioniran je treći stupanj rakete koja je bacila satelit, stavljen prethodno u žiroskopsku rotaciju, u transfer orbitu vrlo ekscentričnog oblika, s apogejom na visini sinhrone orbite — dakle cca 36 000 km — vršeći istovremeno korekciju inklinacije prema ekvatoru na 18,2°. Satelit se sada dijeli od rakete vektora. Kod četvrtog prolaza kroz apogej, dolazi do povećanja brzine vlastitim pogonom (H_2O_2) u cilju modifikacije perigeja. Pri šestom prelazu preko ekvatora u eliptičkoj orbiti i nakon preciznog postavljanja u položaj, stavlja se u pogon opet propulzioni sistem. Usklađivanjem odnosa između potiska ovog sistema i brzine postizava se kompletna korekcija nagiba ravnine orbite, a satelit se nalazi sada u cirkularnoj orbiti. U udaljenosti na kojoj je on sada (okruglo 6 radiusa Zemlje) zemljino privlačenje relativno je slabo, pa su opterećenja pogonskih »motora« već relativno zanemariva. Nakon opisanih operacija karakteristike postignute orbite vrlo su blizu potrebnima, pa se narednih dana vrše samo fine korekcije koje trebaju dovesti do preciznog sinhronizma i potpune okomitosti na ravninu orbite osi žiroskopske rotacije. Ukupan broj operacija izvršenih na perhidrolskim »motorima« je slijedeći:

broj manevara za orijentiranje 5
broj manevara korekcije brzine 4
broj elementarnih intervencija na sapnice 2969

početna količina pogonskog sredstva 4,6 kg
preostala količina 2 kg

Dovođenje u orbitu EARLY BIRD-a vidi se shematski na slici 7.4.6.

O težinama kasnije lansiranih komunikacionih satelita, iz serije INTELSAT, postoji dosta podataka koji se međusobno ne slažu. Iz (3) dajemo početne težine i težine u orbiti:

INTELSAT I	68/37 kg
INTELSAT II	118/85 kg
INTELSAT III	288/144 kg
INTELSAT IV	1112/450 kg

Vidimo da se radi o težinama koje ni za ranije spomenute rakete ne predstavljaju problem kao korisni teret.

Od raketa koje danas postoje u USA* navode se (4):

Delta-DSV-3L može dovesti u	sinhronu	orbitu	153 kg
Atlas/Centaur-TE-364-3	„	„	724 kg
Titan III C	„	„	950 kg
Saturn V	„	„	27 150 kg

U razmatranju je, dalje, nekoliko raketa nosilaca koje bi trebale biti razvijene u periodu 1970—1980. Titan bi, na primjer, s nizom poboljšanja trebao ići znatno iznad 950 kg.

Osim Sovjetskog Saveza koji raspolaže snažnim raketama, iako za lansiranje svojih komunikacionih satelita tipa Molnia nije trebao posebno snažne rakete, pojavljuje se u Evropi, kao međudržavna organizacija, osnovana 1962, pod imenom ELDO (CECLES) sa svrhom da konstruira i lansira rakete koje bi omogućile Evropi da napravi ono što je, u satelitskoj tehnici, iz niza razloga, teško ili nemoguće napraviti bez vlastitih mogućnosti lansiranja. Prvi program CECLES, koji je trebao biti završen 1971, odnosi se na konstrukciju rakete takve da bi u jednu nižu orbitu mogla postaviti teret od 1 200 kg a teret od oko 170 kg u geostacionarnu (5). Napomenimo da je raketama ove grupe u planu i lansiranje satelita za Euroviziju o kome će još biti govora.

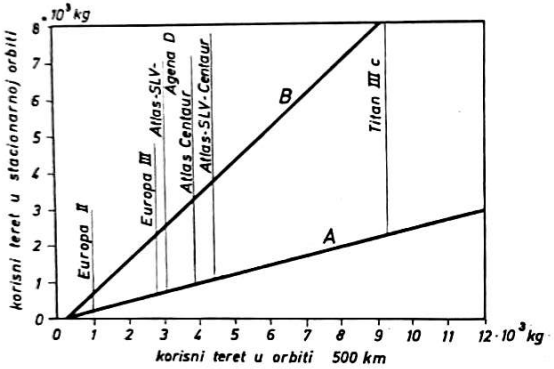
Iz okvira našeg razmatranja izlaze analize potroška goriva i potrebne snage potiska za dovođenje korisnog tereta u razne putanje. Iz podataka koji su dani gore vidi se, međutim, da kapacitet dizanja znatno pada s rastućom visinom orbite. Za lansiranje radiodifuznih satelita, koje moramo smatrati velikima, ostaju rakete tipa Titan i Saturn (uz odgovarajuće rakete Sovjetskog Saveza) dulje vremena jedine. Napomenimo također, da je današnja cijena takovih raketa 18 do 30 milijuna USA $, po jedinici lansiranja.

Već su dulje vremena diskutirane ideje (6), (7), (8) i vršeni pokusi (9) za zamjenu kemijskog goriva, kao pogonskog, drugim koje bi davalo veće specifične impulse uz znatno manju potrebnu težinu. I u najnovije vrijeme javlja se ideja (10) da se zadnji stupanj s kemijskim gorivom zamijeni električkom propulzijom. Posebna prednost ovog načina leži u činjenici da bi se za propulziju dala upotrebiti instalacija koja bi kasnije služila za opskrbu električkom energijom odašiljačkih uređaja na satelitu. Potrebno je, dalje, naglasiti da se na ovaj način dadu dovesti u orbitu i vrlo veliki tereti, relativno male-

* O sovjetskim raketama, na žalost, nema podataka koji bi bili pristupačni.

nim raketama, na primjer onima iz programa ELDO. Vrijeme transfera iz jedne niže orbite u stacionarnu, moglo bi trajati 2 do 3 mjeseca. Kao izvor energije dolazili bi u obzir uređaji s reaktorima iz dva osnovna razloga: solarne baterije, pogotovo u jednoj nižoj orbiti, dolazile bi često i dugo u sjenu. Pri prelazu u stacionarnu orbitu zadržavale bi se, osim toga, relativno vrlo dugo u Van Allen-ovim pojasevima, u kojima bi radijacije znatno snizile kapacitet solarnih baterija.

Ideja o električkoj propulziji, o kojoj je ovdje riječ, sastojala bi se u slijedećem: nakon odvajanja klasične rakete koja dovodi čitav sistem u 500 km visoku »parking« orbitu, dolazi do razvijanja same konstrukcije satelita i njegove stabilizacije. Satelit se sada sastoji u biti iz tri dijela: energetskog, onog za električku propulziju i komunikacionog satelita u užem smislu, koji se po veličini može razlikovati od komunikacionih satelita lansiranih do sada. Njegov su sastavni dio, dakako, i svi ostali specifični elementi, potrebni za pravilan rad komunikacionog satelita.



Slika 7.4.7

Po masi i površini najveći je dio energetski a na njega je, na dugoj motki, vezan propulzioni koji se sastoji iz niza živinih ionskih propulzora s pojedinačnom ulaznom električkom snagom od 6 do 8 kW, u danom primjeru ukupno 25 kW. Živa se raspodjeljuje iz centralnog rezervoara a energija dovodi kao visokonaponska trofazna na svaki propulzor gdje se prerađuje u potreban oblik. Ovi propulzori dovode komunikacioni satelit, koji se nalazi na dugoj motki, vezan za centralnu jedinicu, iz parking orbite u stacionarnu, nizom sukcesivnih operacija.

Ideja o električkoj propulziji nije, kako smo napomenuli, nova ali niz postavki nije mogao, do danas, biti verificiran iskustvom. Neovisno o tome, analize pokazuju da je ideja vrlo atraktivna i tehnički i ekonomski. To pokazuje primjerice i slika 7.4.7 u kojoj su dani odnosi korisnog tereta u geostacionarnoj orbiti s istim osnovnim raketnim sistemom a sa zadnjim stupnjem jedanput s visokoenergetskim kemijskim (krivulja A) gorivom, a drugi put s električkim (krivulja B).

LITERATURA

(1) *Voge:* Telecommunications intercontinentales par satellites artificieles, OE maj 1963, str. 489—502.

(2) *Gatland:* Telecommunication Satelites, Iliffe Books Ltd, 1964, str. 25 do 28.

(3) Telespazio-Comsat: Etude preliminaire sur un reseau de transmissions televisuelles de l'UER, 1969.

(4) Doc A/AC. 105/51, UN Commite on the peaceful uses of outer space, februar 1969.

(6) *Saltzer:* Comparison of chemical and Electric Propulsion systems for Interplanetary Travel, PIRE, april 1960, str. 465—476.

(7) Ramo Laboratory Staff: Electrostatic propulsion, PIRE, april 1960, str. 477—491.

(8) *Kash:* A comparison of Ion and Plasma Propulsion, PIRE, april 1960, str. 458—465.

(9) *Manoogian:* The challenge of space, Electronics 24. april 1959, str. 69 i 71.

(10) *W. Rasch et al.:* Conceptual Study of satellites fer direct-TV-broadcast With Incore-Thermionic-Reactor..., Doc A/CONF. 34/I. 11. UN conference on the Exploration and Peaceful Uses of Outer Space.

8.

Ograničenje snage odašiljača na satelitima

Dok su kod telekomunikacionih satelita u užem smislu ograničenja vezana na čitav niz raznovrsnih problema, kod radiodifuznih će, obzirom na snagu, o kojoj će još biti govora, a koja je — za zadatke koji se na njih postavljaju — potrebna, osnovna tehnološka ograničenja biti vezana na izlaznu elektronku i ono što je s njome u vezi.

Veličina problema dolazi naročito do izražaja ako se ima na umu činjenica da su potrebe — barem u teoretskim razmatranjima — od desetak vata do par megavata (isijane snage, dakako), a da su snage koje danas imamo u orbitama reda 100 W.

Činjenicu da ovi problemi mogu biti odlučni za dovoljno pouzdane radiodifuzne satelite, uvidjela je u cijelosti NASA, a na njihovo rješavanje svestrano se je bacila i industrija niza zemalja a posebice USA.

Za razliku od uvjeta na Zemlji, traži se kod satelita — uz snagu — veći stupanj djelovanja, dulje trajanje a posebice i drugi način odvođenja topline koja nastaje kao posljedica gubitaka kod transformacije energije. Ako se radi o snagama reda 100 W i frekvencijama do par hiljada MHz, postoji danas mogućnost realizacije, kod tražene efikasnosti i praktičke upotrebljivosti u prostoru, uz primjenu poluvodiča. Eksperimentalne jedinice za 800 MHz i 80 W postoje i bit će uskoro ispitane u prostoru. Za dobivanje većih snaga, bit će moguće slaganje modula u paralelni pogon. Uz neke prednosti ovakvog rješenja javljaju se, dakako, i nedostaci u obliku dodatnih krugova koji, između ostalog, povećavaju i težinu satelita.

Mogućnost da se uređaji s poluvodičima ispitaju u pogonu ubrzanim postupkom, daje niz izgleda za znatno skraćenje roka potrebnog inače za testiranje pouzdanosti. Zbog toga izgleda realna nada da će u slijedećoj dekadi moći biti realizirane u poluvodičkoj tehnici jedinice sa snagom od nekoliko kilovata i stupnjem djelovanja od kakvih 40%.

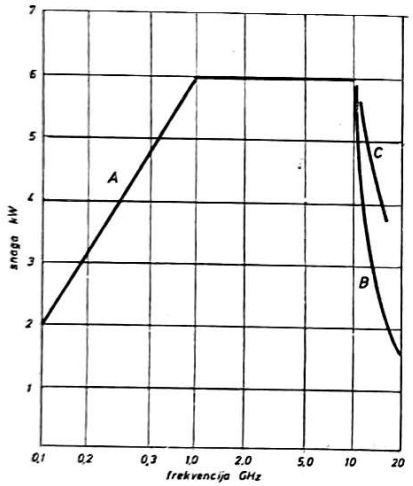
Za znatno veće snage i više frekvencije preostaju elektronke: triode, klistroni i elektronke s putujućim valovima (TWT). Pokusi trajanja i pouzdanosti ubrzanim postupkom s elektronkama ne mogu se izvoditi, pa je, prema tome, elektronke s krugovima potrebno ispitivati tri do pet godina prije očekivanja lansiranja satelita koji bi uređaje s njima nosio.

Rad u području 800 MHz može se, na zadovoljavajući način, osigurati modernim keramičkim triodama. Novi tipovi ovih elektronki, sada u preliminarnom ispitivanju, moći će dati do 2 kW i raditi u prilagođenom krugu sa

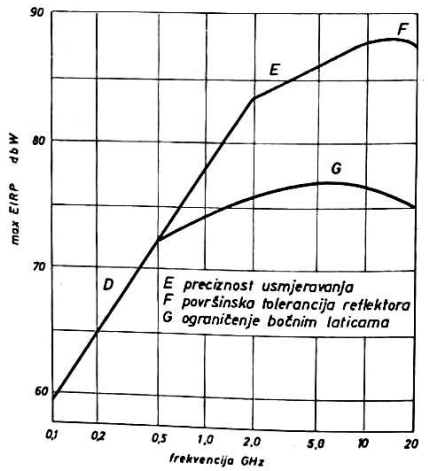
stupnjem djelovanja do 60%. Za snage iznad 2 kW moguć je paralelni pogon. S klistronima i elektronkama s putujućim valovima moguće je postići snage 1 do 7,5 kW u frekventnom području od 2 do 20 GHz. Očekivani stupanj djelovanja od 35% do 60% padat će kao i raspoloživa snaga s rastućom frekvencijom. NASA, uostalom, ima u ispitivanju nekoliko tipova ovakvih elektronki s ciljem poboljšanja stupnja djelovanja u svemirskim uvjetima, uz želju da se postigne adekvatno trajanje života, odvođenje topline, smanjenje dimenzija i težine. Rezultati ispitivanja vrlo su ohrabrujući: predviđaju se stupnjevi djelovanja 55% do 70% jednako kao što se očekuje efektivno trajanje od dvije godine. U sva ova ispitivanja uključen je, međutim, niz modernih teorija i tehničkih postupaka, pa je niz predviđanja dobivenih računski potrebno praktički verificirati, prije definitivnog projekta i davanja dozvole za konstrukciju.

Paralelno s ovim vrše se i napori za studiranje problema visokofrekventnih krugova koje treba ugraditi u odašiljače snage do 20 kW, te problema distribucije visokofrekventne energije odnosno dovođenja energije na antenu. Studije su sada ukazale i na problem komponenata općenito, neke tehničke i tehnološke probleme, te probleme hlađenja.

Osnovni problem u vezi s nizom komponenata je rad u prostoru koji je praktički vakuum. Proboji uzrokovani nizom razloga u ovim uvjetima ograničavaju veličinu prerađene ili prenešene snage za niz komponenata. Stavljanje pod tlak koje je moguće na Zemlji ili inače kratkovremeno, ne dolazi za satelitske uređaje, iz razumljivih razloga u obzir. Komponente, pogotovo filteri za formiranje bočnog pojasa u slučaju amplitudne modulacije, multiplekseri i slično predstavljaju, uz to, i drugi problem: obujam i težinu (1).



Slika 8.1



Slika 8.2

Ograničenja uvjetovana elektronkama i komponentama dana su na slici 8.1 (2). Snagu dane elektronke ograničava gustoća struje koju može dati katoda i dozvoljena gustoća elektronskog snopa (krivulja B). Između izlaznog stupnja i antenskog sistema nalazi se valovod koji predstavlja element —

izvor ograničenja i to na dva načina: naponski (krivulja A) i zagrijavanjem uslijed gubitaka (krivulja C).

Vodeći računa o gornjim ograničenjima te o mogućnostima antene i njihovim svojstvima u ovisnosti o frekvenciji, izrađen je diagram sa slike 8.2 koji pokazuje veličinu isijane snage moguće za tehničku realizaciju u slijedećim godinama (2). Diagram je izrađen za antenu promjera 12 m a pojedini dijelovi krivulje pokazuju što će za pojedine slučajeve biti ograničavajuća okolnost odnosno elemenat.

LITERATURA

(1) *Scharfman, Morita:* Voltage Breakdown of Antenas at high Altitude, PIRE, novembar 1960, str. 1881 i dalje.

(2) CCIR Doc IV/458 od 2. X 1969.

9.

Maksimalna dozvoljena gustoća fluksa i disperzija energije

U pojedinim područjima frekvencija dolazit će posve sigurno do potrebe zajedničkog rada telekomunikacionih sistema u koje su uključeni sateliti i usmjerenih veza na Zemlji, a i općenito do potrebe rada na istim frekvencijama satelitskih i zemaljskih službi. Kako bi se međusobne smetnje u takvim slučajevima svele na podnosiv iznos, potrebno je, između ostalog, pobrinuti se da gustoća toka na površini Zemlje, stvorena satelitskim stanicama, ne pređe određeni iznos. S druge strane, potrebno je — dakako — voditi računa o tome da postavljena ograničenja ne dovedu u pitanje širinu koncepcije veza putem komunikacionih satelita.

Za veze odnosno emisije putem satelita, odnosno sa satelita, koje primjenjuju frekventnu modulaciju, mogla bi se primijeniti kao mjera, disperzija energije nosioca, kako bi se smanjila gustoća fluksa u bilo kojem pojasu širine 4 kHz, u slučaju malenog opterećenja telefonskim signalima višekanalnih satelitskih veza ili televizijskim signalom. U sistemima koji primjenjuju frekventnu modulaciju može se, kako je lako pokazati, dogoditi da se velik dio isijane energije nalazi koncentriran na frekvenciji nosioca ili u njegovoj okolini. Kod prenosa televizijskog programa to će se, na primjer, dogoditi ako se prenose velike površine jednake svjetloće.

CCIR (1) predviđa, za područja od 1 GHz do 10 GHz, tamo gdje dolazi do preklapanja u frekventnom području između usmjerenih veza s direktnom vidljivošću na Zemlji i satelitskih veza, kao maksimalnu gustoću fluksa na Zemlji, uzrokovanu emisijom sa satelita, za sve metode i sve uvjete modulacije za bilo koji pojas širine 4 kHz (A. 358) sa

$$\left(-152 + \frac{\Theta}{15}\right) \text{ dbW/m}^2 \qquad (9.1)$$

Tu je Θ kut, iznad horizonta, pod kojim se, iz točke na Zemlji koja je u pitanju, vidi satelit (zenit: $\Theta = 90^0$), odnosno kut pod kojim energija stiže u dotičnu točku sa satelita.* CCIR je, ne smije se zaboraviti, postavio (2) i dva druga ograničenja, tj. — 149 dbW/m² za svaka 4 kHz i — 130 dbW/m² za globalni fluks, neovisno o kutu upadanja, ako je primijenjena frekventna modulacija sa širokom devijacijom. Vrijednost iz (1) primljena je na plenarnom zasje-

* Oznaka Θ zadržana je da bi se osigurao kontinuitet terminologije i označavanja uobičajen u dokumentima CCIR. Lako je vidjeti da je $\Theta = \varepsilon$ iz poglavlja 2.2.

danju u Oslu jednoglasno kao jedino ograničenje preporučeno od CCIR-a. Potrebno je, međutim, da ta vrijednost bude prihvaćena i sa strane Konferencije za radiokomunikacije.

Svjetska Administrativna konferencija za spacijalne komunikacije (lipanj — srpanj 1971) daje, tamo gdje dolazi do preklapanja u frekventnom području između usmjerenih veza s direktnom vidljivošću na Zemlji i satelitskih veza, kao maksimalne dozvoljene vrijednosti, za sve metode i uvjete modulacije

— 154 dbW/m²/4 kHz za frekvencije	1 670— 2 500 MHz
— 152 dbW/m²/4 kHz za frekvencije	2 500— 7 750 MHz
— 150 dbW/m²/4 kHz za frekvencije	8 025—11 700 MHz
— 148 dbW/m²/4 kHz za frekvencije	11 700—12 750 MHz
— 115 dbW/m²/1 MHz za frekvencije	17 700—23 000 MHz

za $0^0 \leq \Theta \leq 5^0$, s odgovarajućim (apsolutnim) porastom za veće kuteve (10 db za $25^0 < \Theta \leq 90^0$).

CCIR se bavi, dalje, i metodama odnosno mogućnostima za disperziju, bilo kod prenosa — putem satelita — multikanalnih telefonskih veza, bilo kod prenosa televizijskih signala (3), a isto tako navodi i nekoliko metoda koje su namijenjene postizavanju visokog stupnja disperzije energije kod multikanalnih telefonskih sistema, stavljajući težište na odnos između postignutog efekta i složenosti metoda primijenjenih za disperziju.

Kod prenosa televizijskih signala vršena su ispitivanja degradacije kvaliteta uz dodavanje, prilikom emitiranja, i oduzimanjem, kod prijema, signala kojim bi se mogla vršiti disperzija. Detaljno su ispitivana dva oblika signala — pilasti i trokutasti, simetričnog oblika, s frekvencijom repeticije 50, 25 i 12,5 Hz, sinhroniziranih sa slikom. Nakon demodulacije, potrebno je dodani signal »brisati« iz slike lokalno generiranim signalom koji se dodaje u protufazi. Ako se radi o primljenom signalu, u kojem odnos signal/šum ima iznos koji garantira za kvalitetnu sliku, daje ovaj sistem odlične rezultate ali je vezan na dosta kompliciran instrumentarij.

Efekti distorzije mogu se otkloniti primjenom dobro poznatog, iz tehnike televizije, »black-level-clamping«-a. Kako je poznato, »clamp« je metoda koja se normalno primjenjuje za otklanjanje niskofrekventnih disterzija televizijskog signala. Uspjeh, odnosno rezultati, funkcija su, dakle, signala čije djelovanje treba ukloniti šum koji se u video signalu pojavljuje.

Ispitivanja su, dalje, pokazala da je signal za disperziju, u obliku trokuta, povoljniji od pilastog, obzirom na posljedice u video signalu, nakon »brisanja« signala za disperziju.

Da bi odredili efekte koji se postizavaju disperzijom, na ovaj način, poslužimo se primjerom. Pretpostavimo da karakteristike sistema reduciraju amplitudu vrh-vrh, koja je dozvoljena za signal kojim vršimo disperziju, na 30% amplitude vrh-vrh signala video. Ako se radi o sistemu sa 625 linija i sklopu s preakcentuacijom prema (4), bit će amplituda vrh-vrh signala za disperziju 9,4% devijacije vrh-vrh signala video bez preakcentuacije, a disperzija će biti dana sa

$$10 \log \frac{\text{max. energija u pojasu 4 kHz}}{\text{ukupna energija}} = 10 \log \frac{0{,}004}{0{,}094\ \Delta F_{pp}} =$$

$$= -(14 + 10 \log \Delta F_{pp})\ \text{db} \qquad (9.2)$$

Tu je ΔF_{pp} devijacija vrh-vrh za signal video.

Za jedan projektirani geostacionarni satelit (5) imamo slijedeće podatke koji ilustriraju potrebu disperzije (frekvencija 7,5 GHz).

Snaga odašiljača na satelitu	14,5 dbW
gubici u krugovima	— 1,5 db
dobitak antene	28,0 db
EIRP	41,0 dbW
gubici propagacije	— 202,1 db
dobitak po m² antene	39,0 db
gustoća toka	— 122,1 dbW/m²

Neka je minimalni kut s kojim računamo $\Theta = 20^0$. U tom je slučaju dozvoljena gustoća $\left(-152 + \frac{20}{15}\right)$ dbW/m² = — 150,7 dbW/m²/4 kHz, a to znači da disperzija treba postići redukciju gustoće fluksa snage u svakom pojasu od 4 kHz od — 150,7 + 122,1 = — 28,6 db, a to, dalje, znači:

$$-28{,}6 = 10 \log \frac{0{,}004}{\Delta F_{pp}}$$

U konkretnom slučaju 1 V_{pp} videosignal daje devijaciju nosioca 21,2 MHz a to znači da će signal za disperziju koji mora dati devijaciju 2,897 MHz morati imati amplitudu vrh-vrh od 2,897/21,2 = 0,14 V_{pp} bez preakcentuacije. Ako se upotrijebi normalni CCIR sklop za preakcentuaciju (11 db), onda će amplituda vrh-vrh signala za disperziju morati biti umjesto 0,14 V_{pp} sada 0,496 V_{pp}.

Kad su u pitanju multikanalni sistemi u prenosu preko satelita vrijedi slijedeće: uz pretpostavku da se radi o sistemima s frekventnom modulacijom i velikom devijacijom, smijemo dopustiti da spektar, kod srednje snage, uz uobičajene uvjete opterećenja u vrijeme opterećenosti, ima Gaussovu raspodjelu, pa je efekat uz te uvjete dan sa

$$10 \log \frac{0{,}004}{\sqrt{2\pi\ \Delta F}} \qquad (9.3)$$

Smetnje mogu, dakako, postojati i u protivnom smjeru; pojas 4 GHz, koji je predviđen za veze satelit-Zemlja, upotrebljava se i za usmjerene veze na Zemlji, pa očito postoji opasnost od smetnji sa satelita po zemaljske stanice, kao što i zemaljske stanice, kod emitiranja sa satelita u pojasu 6 GHz, mogu smetati usmjerenim vezama.

Koordinacija će, dakle, biti neophodno potrebna i zato je CCIR (u okviru studijskog programa 2A/IV i pitanja Q 2/IV) dao izvještaj koji govori o načinu i metodama kontrole kompatibilnosti. To je izvještaj koji govori o određivanju koordinacione udaljenosti. Ukoliko su stanice koje su u pitanju — zemaljska stanica i stanice iz mreže usmjerenih veza na Zemlji — u okviru udaljenosti za koordinaciju, potrebno je da se odgovarajuće administracije dogovore i izvrše ispitivanja. Ako su stanice izvan ove zone, mogu se smetnje smatrati zanemarivim. Koordinaciona udaljenost smanjuje se uticajem prirodnih zapreka na terenu koje zaklanjaju stanicu koja smeta. U tom cilju je i praktična preporuka za izbor lokacije, da se zemaljska stanica smjesti u prirodnu ili čak

umjetnu udubinu u terenu, što pogotovo kod stanica s manjim antenama (10 m) nije problem. Izvještaj i preporuke CCIR-a izgledaju, onako kako su formulirane u Oslu 1966, neopravdano oštre, pa se očekuje nova formulacija koja bi bila blaža.

LITERATURA

(1) CCIR Documents de la XI Assamblée Pleniere Oslo 1966, Vol IV Partie 2, str. 212.
(2) Isto — str. 395.
(3) Isto — str. 378 do 388.
(4) CCIR Documents de la XI Assemblée Pleniere Oslo 1966, Vol. IV Partie 1, str. 92.
(5) UER Doc. Com. T (N) 12.

9.1. ODREĐIVANJE KOORDINACIONE UDALJENOSTI

U očekivanju novih metoda primjenjuje i IFRB* kod notifikacije stanica, još — uglavnom — kontrolne račune bazirane na materiji iz tih izvještaja i preporuka (382 i 388 CCIR (1), (2). Ovu sekciju o koordinaciji bazirat ćemo, također na toj materiji.

U izvještaju 382 osnovni gubici propagacije (L_b) su dani izrazom

$$L_b = (P_T + G_T) - F_M - (P_R - G_R) \qquad (9.1.1)$$

gdje, u ovom specijalnom slučaju, znači:

P_T = snaga u dbW ili gustoću snage u dbW u pojasu 4 kHz (dbW/4 kHz) koju odašiljač, čije smetnje ispitujemo, daje na ulaz svoje antene.

G_T = dobitak (prema izotropnom radijatoru), u db, antene stanice koja smeta, u smjeru koji je u pitanju,

F_M = faktor zaštite terenom u db,

P_R = maksimalna dozvoljena snaga nosioca smetača u dbW/4 kHz na ulazu u prijemnik koji može biti smetan,

G_R = dobitak (prema izotropnom radijatoru) prijemne antene stanice koja može biti smetana, umanjen za gubitke u valovodu i diskriminaciju polarizacije, ako se ova može primijeniti.

Iz gornjeg osnovnog izraza slijedi da će stvarno maksimalna efektivna isijana snaga u horizontalnoj ravnini, u svakom pojasu širine 4 kHz biti dana sa

$$(P_T + G_T) - F_M \qquad \text{(dbW/4 kHz)} \qquad (9.1.2)$$

* IFRB = International Frequency Registration Board.

Nakon što se numeričke vrijednosti sa G_T i F_M, koje se odnose na azimut za koji je $(G_T - F_M)$ maksimum, unesu u (9.1.2), ne smije dobivena vrijednost preći iznos od + 55 dbW/4 kHz.

U pomanjkanju podataka o snazi privedenoj u bilo kojem pojasu širine 4 kHz mora se u račun ući sa snagom privedenom anteni općenito, što znači s nepovoljnijom vrijednošću za račun.

Vrijednosti za P_T u (9.1.2), ako se radi o frekventnoj modulaciji sa širokom devijacijom (na pr. zemaljske stanice za satelitske komunikacije sa širinom pojasa iznad 300 kHz), računaju se u spomenitim dokumentima iz izraza

$$P_T = 30 - 19 + 10 \log p(\text{kW}) \qquad \text{(dbW/4 kHz)} \qquad (9.1.3a)$$

$$P_T = 11 + 11 \log p(\text{kW}) \qquad \text{(dbW/4 kHz)} \qquad (9.1.3b)$$

$$P_T = -19 + 10 \log p(\text{W}) \qquad \text{(dbW/4 kHz)} \qquad (9.1.3c)$$

Iznos od 19 db koji se gore pojavljuje je faktor konverzije 300 kHz (minimalna širina pojasa kod »širokopojasnih« pogona) prema 4 kHz, za najnepovoljnije uvjete disperzije energije. Snaga dana sa p očito je snaga privedena na ulaz antene.

Ako se radi o frekventnoj ili faznoj modulaciji s uskim pojasom (manje od 300 kHz) može se upotrebiti (9.1.3) ali s time da je primijenjen faktor konverzije za najnepovoljnije uvjete disperzije u iznosu od 0 db.

Što se tiče vrijednosti G_R (odnosno G_T) potrebno je voditi računa o slijedećem:

Ako je Θ_S minimalni kut elevacije glavnog snopa antene zemaljske stanice, manji od 12°, moramo najprije izvršiti komparaciju vrijednosti $(G_A - 8\,\Theta_S)$ i $(G_H - F_M)$ pa se odlučiti za veću od njih i uzeti je kao onu s kojom se računa maksimalna efektivna isijana snaga u horizontalnoj ravnini i koordinaciona udaljenost. Pri tome je G_A dobitak antene prema izotropnom radiatoru (u db) u smjeru maksimalnog isijavanja, a G_H maksimalni dobitak u horizontalnoj ravnini za sve kuteve elevacije veće ili jednake minimalnom.

U slučaju da dijagram isijavanja u horizontalnoj ravnini zemaljske stanice nije poznat postupa se na slijedeći način:

Ako se za određeni azimut zapreka na površini zemlje vidi pod kutem Θ, tada je za taj smjer azimuta potrebno, kod računanja koordinacione udaljenosti, upotrebiti dobitak kod kuta elevacije Θ koji je dan izrazom (6.6), a ne dobitak u ravnini horizonta za taj smjer:

$$G_T,\ G_R = 32 - 25 \log \psi$$

gdje je, kako je rečeno, ψ kut između osi glavnog snopa i smjera o kome je riječ. Gornji izraz vrijedi za $1^0 \leq \psi \leq 48^0$; za $48^0 \leq \psi \leq 180^0$ vrijedi $G_T, G_R = -10$ db.

Ako je — a rekli smo već da je to poželjno — zemaljska stanica smještena tako da je ispod nivoa okolnog terena, potrebno je uzeti u obzir i faktor zaštite terenom F_M koji označava dodatno gušenje u db. U tablici I vidimo vrijednosti prema (3), koje se mogu primijeniti ako su zapreke na putu između 5 i 16 km od zemaljske stanice. Za zapreke koje su dalje od 16 km primjenjuje se metoda iz (4).

TABLICA I

Visina zapreke iznad horizonta u(°)	Faktor zaštite F_M u db
0—1	0
1—2	10
2—3	17
3—4	23
4 i više	25

Za referentno gušenje daje se u (3), kad su u pitanju zemaljske stanice s jedne strane, a stanica iz mreže mikrovalnih veza s druge, uz frekventnu modulaciju:

$$L_b\,(0{,}005\%) = (P_T + G_T) - F_M + 173 \text{ db} \qquad (9.1.4b)$$

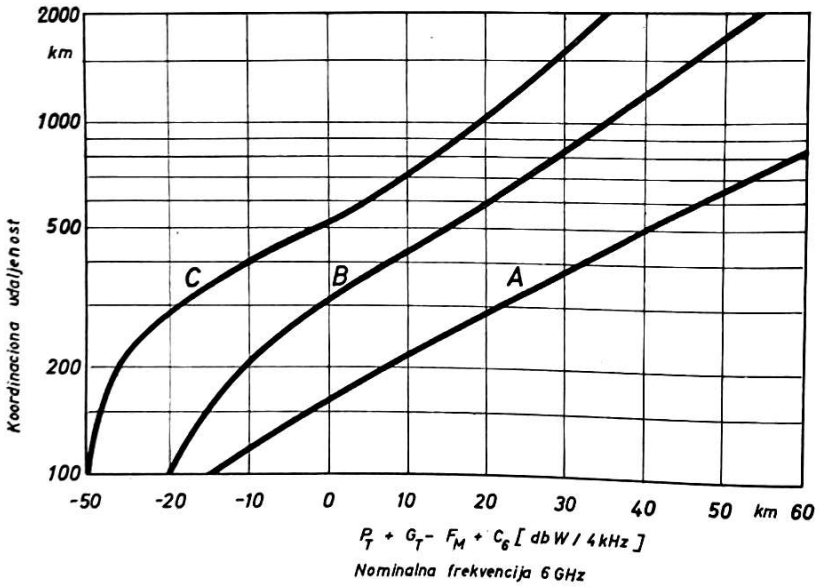
$$L_b\,(20\%) = (P_T + G_T) - F_M + 193 \text{ db} \qquad (9.1.4a)$$

kao vrijednosti za 0,005% odnosno 20% vremena bilo kojeg mjeseca.

Druga vrijednost dolazi u obzir samo za koordinacione udaljenosti ispod najmanje 100 km pa se može izuzeti iz razmatranja.

Udaljenosti koordinacije koje slijede iz prvog izraza dane su na slici 9.1.1 kao funkcija iznosa (9.1.2) i to za razne radioklimatske zone, definirane kao

Zona A = zemlja
Zona B = more na širinama iznad 23,5° S i N
Zona C = more na širinama između 23,5° S i N uključivo.



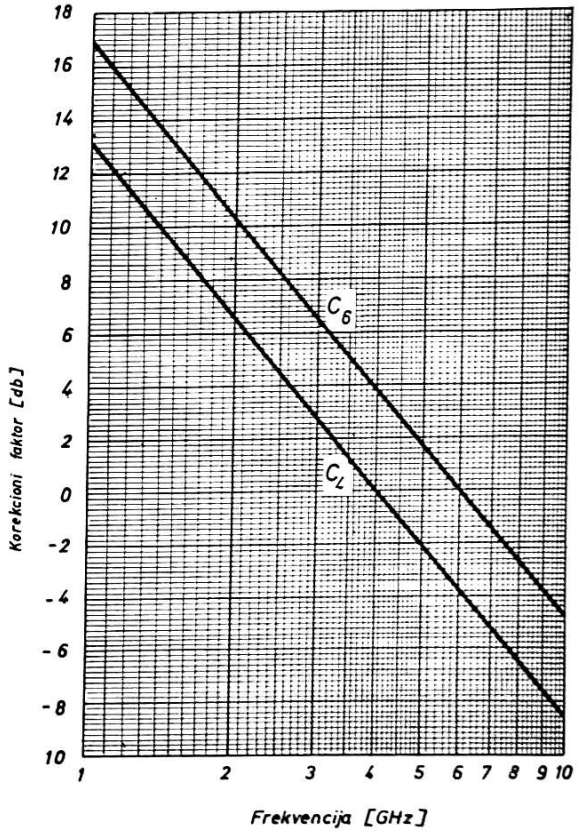
Slika 9.1.1

Krivulje sa slike 9.1.1 omogućile bi direktno određivanje koordinacione udaljenosti ako je poznata EIRP u pojasu 4 kHz i faktor zaštite terenom. Ako se koordinaciona udaljenost dijeli na razne zone, primjenjuje se metoda koja je opisana niže. Krivulje su napravljene za 6 GHz, a ako je radna frekvencija različna od 6 GHz uzima se kao baza vrijednost na osi apscisa

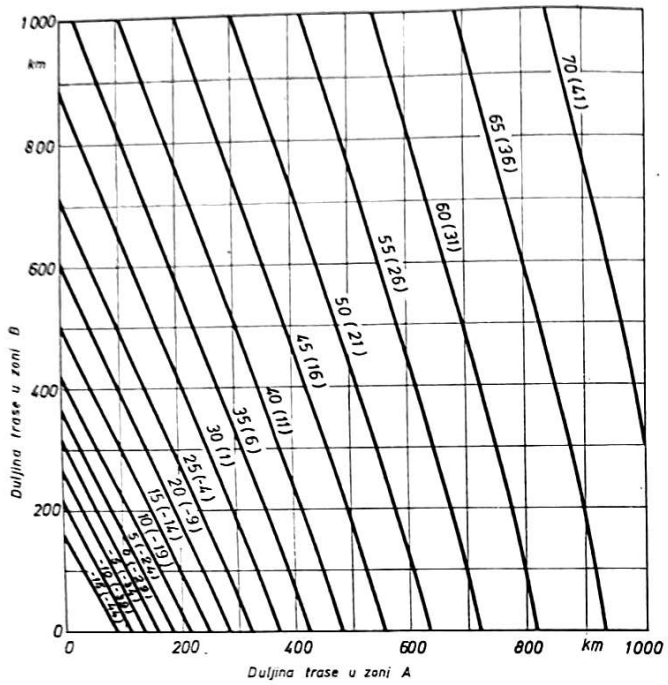
$$(P_T + G_T) - F_M + C_6 \qquad \text{dbW/4 kHz} \qquad (9.1.2a)$$

gdje je C_6 korekcioni faktor u db iz slike 9.1.2. Ovaj faktor dan je kao C_6 i treba ga pribrojiti vrijednosti $(P_T + G_T - F_M)$ ako je frekvencija emitiranja zemaljske stanice različna od 6 GHz, a kao C_4, kojeg pribrajamo vrijednosti $(G_R - F_M)$ ako je prijemna frekvencija zemaljske stanice različna od 4 GHz.

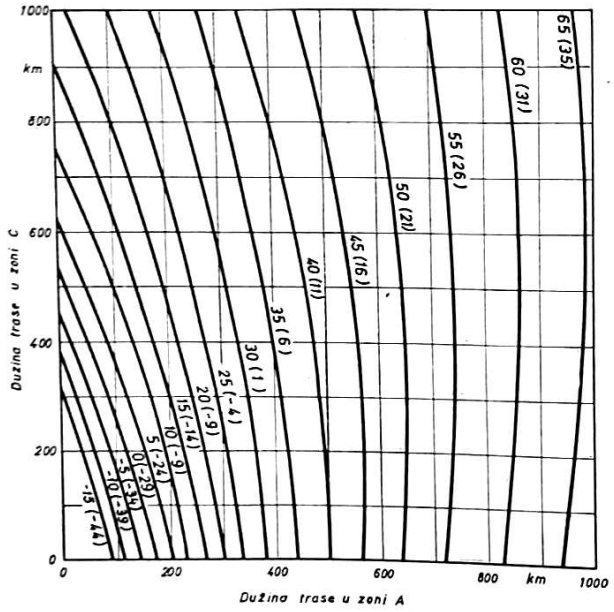
Niz dokumenata CCIR-a prezentiran u razdoblju 1963—1966 pokazuje da koordinaciona udaljenost, računata u ovisnosti o dobitku glavnog snopa antene zemaljske stanice, može — za kuteve elevacije ispod 12° — biti veća od udaljenosti računate uz dobitak u horizontalnoj ravnini. U slučajevima kad je glavni snop antene zemaljske stanice samo nekoliko stupnjeva iznad horizonta a manje od 12°, kroz duge vremenske periode, može se, barem privremeno, primjeniti slijedeća vrijednost s kojom se ulazi u sl. 9.1.1



Slika 9.1.2



Slika 9.1.3

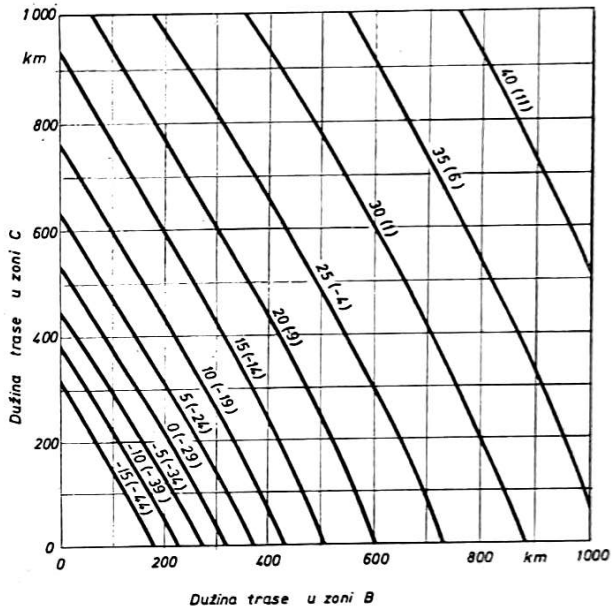


Slika 9.1.4

$$P_T + G_A - 8\Theta \qquad (9.1.2b)$$

ako je Θ kut elevacije, u stupnjevima, glavnog snopa antene zemaljske stanice. Nakon komparacije vrijednosti (9.1.2) i (9.1.2b) uzima se veća i s njome ulazi u sliku 9.1.1.

Ako koordinaciona udaljenost leži dijelom u jednoj a dijelom u drugoj zoni, upotrebljavaju se vrijednosti sa slike 9.1.3,4i5. Odčitavaju se vrijednosti koje nisu u zagradi. Krivulje daju koordinacione udaljenosti kao funkcije duljine puta svake od dviju zona posebice. Ako je duljina puta u jednoj zoni poznata i ako znamo koliko mora biti ukupno gušenje možemo naći duljinu u drugoj zoni. Duljina puta u prvoj zoni poznata je ako znamo granicu te zone u danom smjeru pa se onda duljina u drugoj zoni može odrediti. Ukupna duljina puta ili koordinaciona udaljenost suma je obiju duljina. Slike 9.1.3,4i5 daju mogućnosti računanja u svim slučajevima mješanih zona:



Slika 9.1.5

Krivulje sa sl. 9.1.3: zona A — zona B
Krivulje sa sl. 9.1.4: zona A — zona C
Krivulje sa sl. 9.1.5: zona B — zona C

Kad se izvrši račun koordinacione udaljenosti u svim smjerovima može se nacrtati krivulja koordinacije koja je općenito zatvorena nepravilna krivulja. Ona se očito pretvara u kružnicu ako su istovremeno ispunjeni uvjeti:

— područje u kome se mijenja kut azimuta antene ide od 0° do 360°
— faktor zaštite terenom jednak je nuli ili konstantan od 0° do 360°
— čitava površina na kojoj se vrši koordinacija nalazi se u jednoj radioklimatskoj zoni.

Kad se radi o smetnjama prijemu zemaljskoj stanici, a smetnje dolaze od stanica na Zemlji (uz kutnu modulaciju), osnovno gušenje za 0,01% vremena svakog mjeseca dano je sa (3)

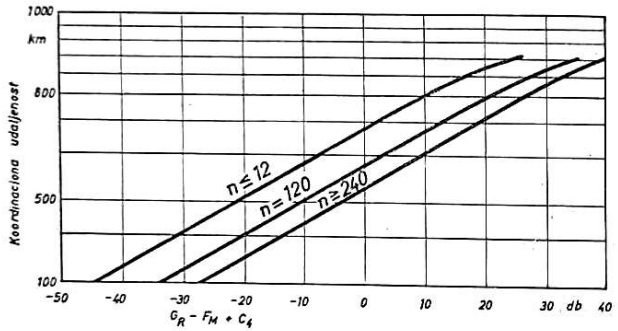
$$L_b\,(0{,}01\%) = (-P_K + G_R) - F_M - B + (P_T + G_T) + 40{,}5\ \text{db} \qquad (9.1.5)$$

B = faktor transfera umanjenja smetnji (u db) za koji su vrijednosti ovisne o broju kanala satelitnog sistema n

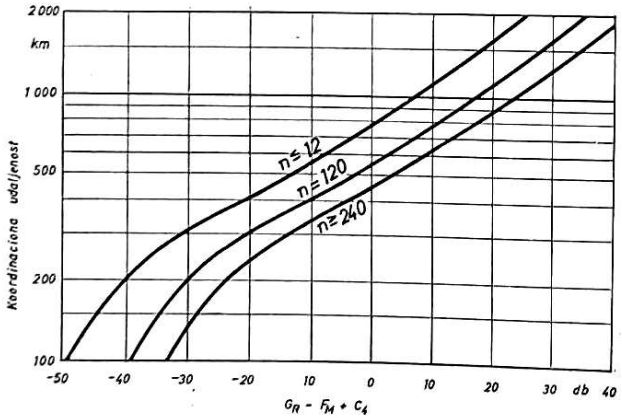
P_K = snaga na ulazu u prijemnik u dbW, nosioca koji je podvrgnut smetnjama

Uz temperaturu šuma sistema zemaljske stanice 50° K možemo za $(B + P_K)$ u ovisnosti o broju kanala uzimati vrijednosti:

broj kanala n	$(B + P_K)$ dbW
12	— 106
130	— 96
240—1200	— 90



Slika 9.1.6

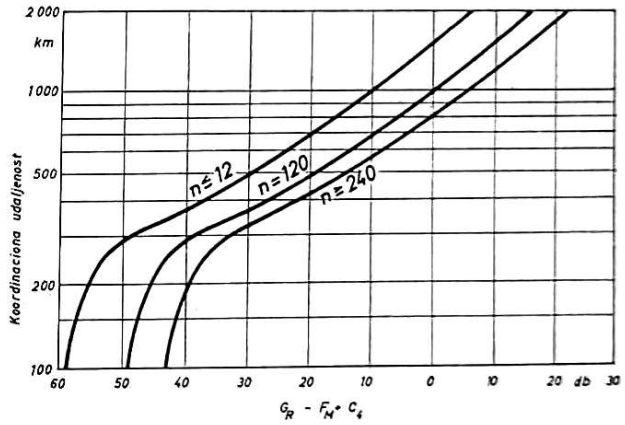


Slika 9.1.7

Sada je moguće računati osnovne gubitke propagacije kao funkciju vrijednosti $G_R - F_M$) a krivulje za to dane su na slikama 9.1.6,7i8, za zone A, B

odnosno C. Za mješane puteve mogu se upotrebiti krivulje sa slikama 9.1.3, 4 i 5 — s time da se uzimaju vrijednosti na krivuljama u zagradi. Krivulje su nacrtane za $n \leq 12$ pa je za $n = 120$ potrebno oduzeti 10 a za $n \geq 120$ iznos od 16 db. Potrebno je napomenuti da se i ovdje $(G_R - F_M)$ može zamijeniti sa $(G_A - 8\Theta)$. Krivulje na slici 9.1.6, 7 i 8 napravljene su za 4 GHz. Ako prijemna frekvencija nije 4 GHz uz vrijednost $(G_R - F_M)$ dodaje se korekcioni faktor C_4 sa slike 9.1.2. Ako n nije poznat uzima se kod računa da je $n = 12$. Krivulje su, dalje rađene za $(P_T + G_T) = +55$ dbW i $T^{(o)} = 50°$ K.

Kao što smo spomenuli, definirane su kao maksimalne vrijednosti gustoće toka snage na površini zemlje razne vrijednosti. Jedna od njih je i — 130 dbW/m². Radi li se o frekventnoj modulaciji sa širokom devijacijom ili faznoj modulaciji, bit će dozvoljene vrijednosti definirane na drugi način. Gustoća toka u svakom pojasu širine 4 kHz računa se, uz uzimanje u obzir konverzionog faktora iz (9.1.3.). Ako je vrijednost veća od gornjeg limita ali ne prelazi — 146 dbW/m²/4 kHz, kod primanja prijave IFRB će smatrati da se može primjeniti preporuka 358 CCIR-a po kojoj je, kako je već rečeno, maksimalna gustoća toka u svakom pojasu širine 4 kHz, na površini Zemlje limitirana na (9.1) neovisno o uvjetima moduliranja.



Slika 9.1.8

Uz uvjete propagacije slične onima u slobodnom prostoru, vrijedi, kako smo vidjeli odnos

$$p_R = \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 p_T \frac{g_T g_R}{d^2}$$

Kako je

$$\frac{\lambda^2}{4\pi} = A$$

efektivna površina izotropnog radijatora (3.4), gornji izraz možemo pisati i u obliku:

$$p_R = \frac{\lambda^2}{4\pi}\frac{1}{4\pi} p_T \frac{g_T g_R}{d^2}$$

$$= g_R \frac{\lambda^2}{4\pi}\frac{1}{4\pi} \cdot g_T p_T \frac{1}{d^2}$$

$$= A' p_T \frac{g_T}{4\pi d^2}$$

gdje je očito A' = efektivna površina antene s dobitkom g_R pa je onda gustoća toka snage dana sa

$$S = \frac{p_R}{A'} = \frac{p_T g_T}{4\pi d^2} \qquad W/m^2$$

ako je d dan u m ili

$$S = P_T + G_T - 10 \log 4\pi - 10 \log 10^6 - 20 \log d \qquad dbW/m^2/4\ kHz$$

$$= P_T + G_T - 71 - 20 \log d \qquad dbW/m^2/4\ kHz$$

ako je d dano u km, P_T u dbW/4 kHz i G_T u db.

Ukupna gustoća toka bit će prema tome dana sa

$$S' = P + G_T - 71 - 20 \log d \qquad dbW/m^2$$

ako je P (dbW) snaga odašiljača predana anteni s dobitkom G_T.

U (1) dano je nekoliko primjera računanja koordinacione udaljenosti koje za ilustraciju primjene onog što je iznešeno gore navodimo:

a) Smetnje koje uzrokuje odašiljač zemaljske stanice prijemu stanica na Zemlji (mikrovalni sistemi s optičkom vidljivošću).

1. Emisiona frekvencija zemaljske stanice	7900 MHz
2. Širina pojasa i vrsta emisije	50000 F 9
3. Snaga (p)	4 kW
4. Maksimalni dobitak antena (G_A)	61 db
5. Maksimalni dobitak antene u horizontalnoj ravnini za svaki kut elevacije veći od minimalnog (G_H)	10 db
6. Minimalni kut elevacije antene (Θ)	6^0
7. Faktor zaštite terenom (F_M)	0 db

$P_T = 11 + 10 \log 4 = 17$ dbW/4 kHz

$G_H - F_M = 10 - 0 = 10$ db

$G_A - 8\Theta = 61 - 8.6 = 13$ db

$G_T - F_M = 13$ db

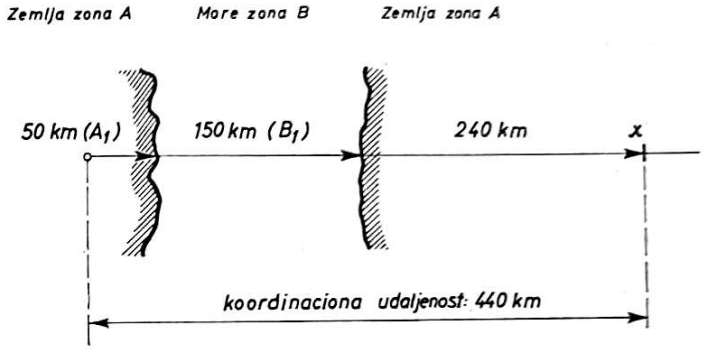
$P_T + (G_T - F_M) = 17 + 13 = 30$ dbW/4 kHz

Dobivena vrijednost je manja od 55 dbW/4 kHz pa, prema tome, zadovoljava.

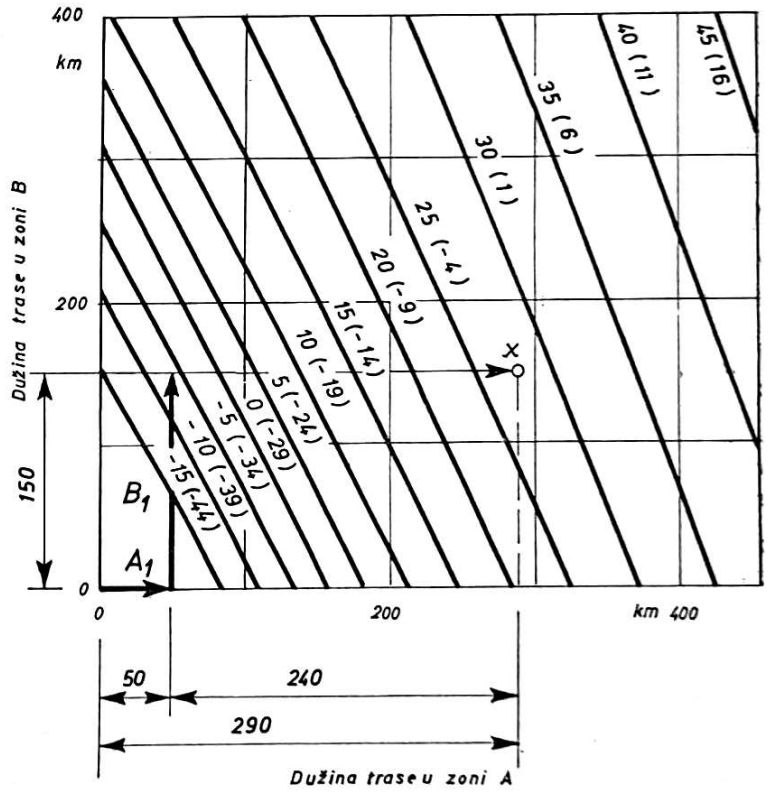
Kako je radna frekvencija 7,9 GHz bit će iz diagrama na sl. 9.1.2 korekcioni faktor $C_c = -2$ db, pa imamo

$$P_T + (G_T - F_M) + C_c = 17 + 13 - 2 = 28\ dbW/4\ kHz$$

Ako sa ovom vrijednošću uđemo u diagram sa slike 9.1.1, možemo za razne zone naći slijedeće koordinacione udaljenosti



Slika 9.1.9



Slika 9.1.10

Zona A 370 km
Zona B 800 km
Zona C 1500 km

Ako se radi mješanim zonama možemo situaciju razmotriti na primjer sa sl. 9.1.9. Tu je za zemaljsku stanicu, u jednom smjeru zona A u duljini 50 km a iza toga more (zona B) u duljini 150 km do druge obale. Sa slike 9.1.10 možemo naći koordinacionu udaljenost tako da pođemo s A_1 (50 km) u zoni A (os apscisa) a onda paralelno s osi zone B s B_1 (150 km). Paralelno s osi A idemo iz ove točke do vrijednosti krivulje + 28 dbW/4 kHz (točka x). Presjecište s tom krivuljom odgovara duljini u zoni A 240 km pa je prema tome ukupna koordinaciona udaljenost d = 50 + 150 + 240 = 440 km.

b) Smetnje uzrokovane odašiljačem iz mreže mikrovalnih veza prijemniku zemaljske stanice.

1. Prijemna frekvencija zemaljske stanice	3500 MHz
2. Maksimalni dobitak prijemničke antene (G_A)	50 db
3. Maksimalni dobitak prijemničke antene u horizontalnoj ravnini za svaki kut elevacije iznad minimalnog (G_H)	5 db
4. Minimalni kut elevacije (Θ)	6°
5. Faktor zaštite terenom (F_M)	0 db
6. Broj kanala (n)	960
7. Planirani azimut	80°—110°

$(G_H - F_M) = 5 - 0 = 5$ db

$(G_A - 8\Theta) = 50 - 8.6 = 2$ db

Iz toga je

$(G_R - F_M) = 5$ db

za azimut 80°—110°

Konverzioni faktor (3,5 GHz) $C_4 = +1$ db pa je

$(G_R - F_M) + C_4 = 5 - 0 + 1 = 6$ db

Iz krivulja sa slika 9.1.6, 7 i 8 imamo za n = 240, za razne zone

Zona A d = 240 km
Zona B d = 560 km
Zona C d = 1000 km

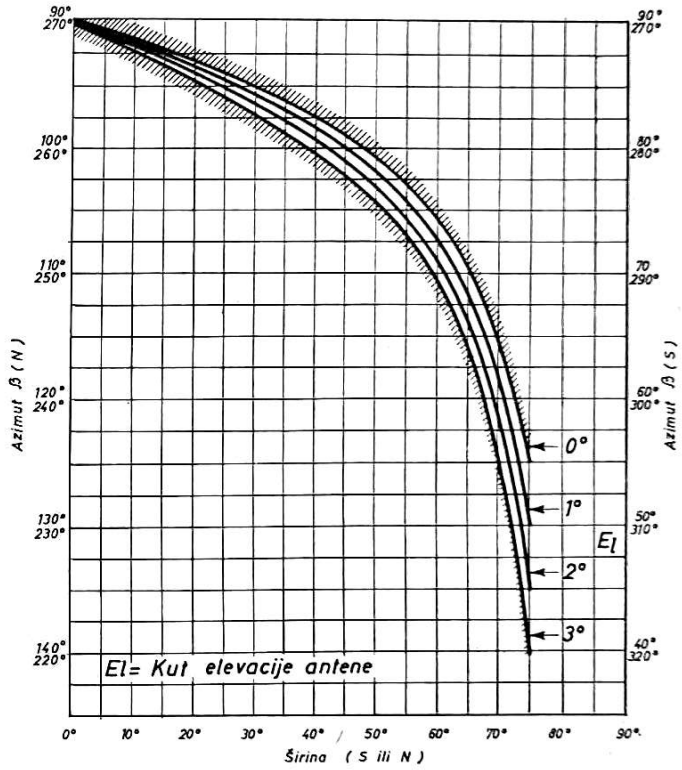
Ako su u pitanju mješane zone potrebno je od vrijednosti $(G_R - F_M) + C_4 = +6$ db oduzeti 16 db, pa se koordinaciona udaljenost dobiva sa krivulje koja je označena s (— 10) na krivuljama sa slika 9.1.4,5i6.

Da bi se dobili što bolji uvjeti prijema na strani stacionarnih komunikacionih satelita, dano je u Oslu 1966 (5) mišljenje prema kojem bi bilo potrebno da se nove trase mikrovalnih veza, a isto tako i novi sistemi na postojećim trasama, kad god je to moguće, planiraju tako da os glavne latice svih novih antena tih veza ne bude usmjerena prema stacionarnoj orbiti pod kutem manjim od 2°. Ukoliko bi se u pojedinim slučajevima pokazalo da je ovaj zahtjev nemoguće održati moraju biti poštivana slijedeća ograničenja:

+ 47 dbW za sve latice antene koje sa smjerom prema stacionarnoj orbiti zatvaraju kut manji od 0,5°;

+ 47 do + 55 dbW za sve latice antene koje sa smjerom prema stacionarnoj orbiti zatvaraju kut od 0,5° do 1,5°; porast snage je linearan (8 db po stupnju kuta).

Iz gornjeg slijedi da će za nove trase odnosno sisteme biti potrebno provjeriti razliku između azimuta maksimuma glavnog snopa i azimuta smjera prema stacionarnoj orbiti za danu lokaciju.



Slika 9.1.11

U principu će za svaku točku postojati dva smjera u kojima će stacionarna orbita probijati ravninu horizonta za tu točku. Ova dva smjera bit će očito simetrična obzirom na meridijan točke, a veličina kuta među njima bit će funkcija geografske širine točke i kuta elevacije osi glavnog snopa antene stanice iz sistema mikrovalnih veza. Ako je ovaj nula, bit će očito granične vrijednosti kuta između dvaju smjerova 180° (za točku na ekvatoru i 0° za točku na širini 81° 19′ 38″ za koju se ova dva smjera stapaju u jedan. Vrijednosti azimuta ovih smjerova vidimo na slici 9.1.11. Očito je da ćemo za kontrolu uzimati uvijek onaj koji je bliži azimutu glavnog snopa.

(1) IFRB Suplement N° 2 to the rules of procedure of the IFRB, Geneva 1969.
(2) CCIR Documents of the XIth Plenary assembly, Oslo 1966, vol IV/2, Geneva 1967, str. 356 i 398.
(3) CCIR Documents of the XIth Plenary assembly, Oslo 1966, vol IV/2 str. 356 i dalje.
(4) Isto vol II, str. 170 i dalje.
(5) CCIR Documents of the XIth Plenary assembly, Oslo 1966, Vol IV/1 Geneva 1967. str. 96.

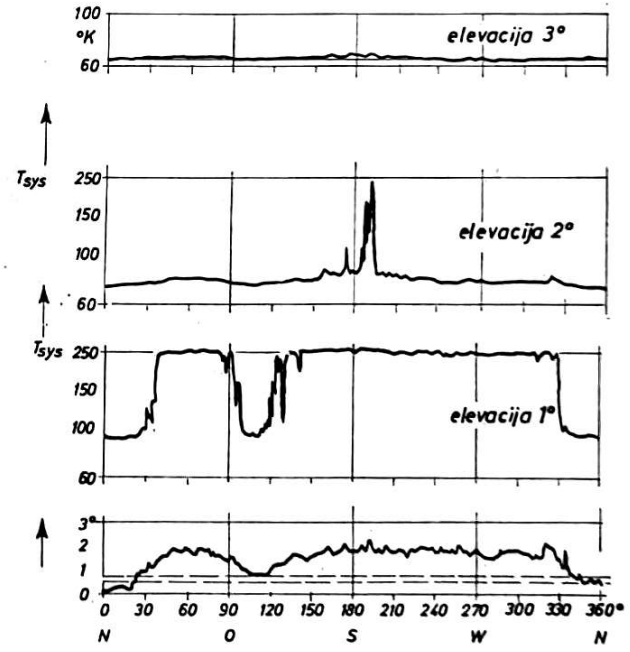
10.

Zaštitne mjere kod zemaljskih stanica

Kod postavljanja zemaljskih stanica za satelitske veze potrebno je poduzeti neke mjere odnosno voditi računa o nekim činjenicama, da se, s jedne strane, omogući nesmetan rad stanici, a s druge osigura okolinu od potencijalnih opasnosti koje, u prvom redu, odašiljač stanice može skrivati.

U vezi s prvim dijelom problema potrebno je lociranje stanice izvršiti tako da, između ostalog (1):

— bude izbjegnuta direktna vidljivost sa stanicama na Zemlji koje bi mogle smetati radu (prijemu) zemaljske stanice;
— minimalna udaljenost do odašiljača koji bi mogao smetati bude najmanje 50 km, ako je efekt maskiranja terena 3^0 do 4^0. Ova udaljenost smije se smanjiti na 20 km ako je efekt maskiranja reda 10^0. Iz ovog slijedi želja



Slika 10.1

da se zemaljske stanice smjeste u kotline s blagim nagibom okolnog terena, tako da se rubovi pojavljuju pod kutem koji je reda 3 do 4° (slika 10.1);*

— zemaljska stanica, kad se radi o onima koje su vezane na satelite u ekvatorijalnoj orbiti, bude na sjevernoj polukugli postavljena što je moguće južnije od odašiljača koji smeta;

— zemaljska stanica bude udaljena od otvorenih obalnih pojaseva zbog povećanih smetnji (propagacija preko mora).

U svakom slučaju korisno je na lokaciji izvršiti ispitivanje i mjerenje i ocijeniti od kojih se osnovnih zahtjeva može odstupiti ili ih detaljno ispitati.

Ono od čega ne bi trebalo odstupati je zahtjev da se na terenu može postaviti i još jedan veliki antenski sistem, te da na terenu ne bude nikakvih velikih i visokih struktura, bilo prirodnih (drveće), bilo ljudskih konstrukcija (stupovi dalekovoda, na primjer).

Drugi problem je zemaljska stanica sama u odnosu na okolinu. Na drugom mjestu pokazano je da će snaga s kojom će odašiljački dio zemaljske stanice raditi biti znatna i da će ona, iz razloga koje računi reljefno ističu, biti servirana s vrlo velikom gustoćom toka snage, što dalje znači da će se u određenim udaljenostima od antene, nalaziti i vrlo jaka elektromagnetska polja.

Mikrovalovi o kojima će se raditi mogu na ljudski organizam djelovati na dva načina odnosno dvjema pojavama:

— hipertermija, tj. pretjerano zagrijavanje tkiva,

— gubitak kontrole nad radom mišića koji se pojavljuje u području 200 MHz do 1000 MHz.

Za termičke efekte konstatirano je da opasnost ne postoji ako gustoća energije ne prelazi 0,2 W/cm². Ovo vrijedi za životinje dok je ta granica za ljude viša, jer je sistem regulacije kod čovjeka znatno efikasniji. Što se tiče gustoće toka snage koji se može podnositi dulje vremena, kad se radi o čovjeku, stručnjaci američke avijacije (USAF) dali su kao granicu 0,01 W/cm². Veći dio industrija i komunikacionih kompanija, na primjer COMSAT, drže se gornjih granica ali je, usprkos tome, u nekim zemljama, predložena granica 10 puta niža (Italija, Poljska...), dakle 0,001 W/cm², kao sigurnosna granica. U projektu izvještaja izrađenog za interimno zasjedanje CCIR-a u Genevi 1966 (2) predviđa se potreba postavljanja pravila i propisa za pristup zonama u kojima gustoća isijavanja prelazi 0,01 W/cm² i zabranjuje se u tom području držanje bilo kakvih zapaljivih ili eksplozivnih materijala. U zonama u kojima bi se ljudi trajno zadržavali, potrebno je kao granicu odabrati nižu vrijednost.

Kako znamo, dana je specifična snaga ili gustoća toka u udaljenosti r izrazom:

$$S = \frac{p}{4\pi r^2} g$$

Kako je

$$g = \frac{4\pi A}{\lambda^2} = \eta \frac{4\pi}{\lambda^2} \frac{D^2\pi}{4}$$

* Na slici se lijepo vidi uticaj okoline na temperaturu šuma sistema.

$$S = \frac{p}{4\pi r^2} \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\pi D^2}{4} \eta = \frac{p\pi D^2}{4r^2\lambda^2} \eta$$

Ovaj izraz možemo pisati u obliku

$$S = \frac{p\pi}{2r^2\lambda} \eta \frac{D^2}{2\lambda} \qquad (10.1)$$

$(D^2/2\lambda) = R$ je veličina poznata kao Rayleigh-ova ili Fressnel-ova udaljenost. Izraz za S možemo sada pisati

$$S = \frac{p\pi}{2r^2\lambda} \eta R = \frac{p\pi\eta}{D^2} \left(\frac{R}{r}\right)^2$$

Uz p u kW, D u m i $\eta = 0{,}65$ imamo

$$S = \frac{204p}{D^2} \left(\frac{R}{r}\right)^2 \quad \text{mW/cm}^2 \qquad (10.2)$$

Ova raspodjela vrijedi samo za Fraunhoferovo područje, tj. za $r \geq 2R$. Za $r < 2R$ bit će tok unutar cilindra kojem je baza površina aperture paraboloida. U tom je području teško odrediti teoretskim putem gustoću toka. Eksperimentalna istraživanja dala su poluempiričke formule, pa se tako tvrdi da je apsolutni maksimum fluksa snage u udaljenosti od cca 0,5 R. Uz $\eta = 0{,}65$ kao gore, taj maksimum dan je sa

$$S_{max} = 340 \frac{p}{D^2} \quad \text{mW/cm}^2$$

uz p i D kao gore (3)

U neposrednoj blizini antene potrebno je osigurati se da energija isijana direktno iz iluminatora, koja ne pogađa reflektor ili subreflektor (Spill-over) ne dođe do zemlje s nivoima koji bi bili opasni po personal. Za primjenu ovog potrebno je točno poznavati primarni dijagram isijavanja te kut pod kojim se vidi reflektor ili subreflektor iz faznog centra uzbuđivača.

Slučaj koji smo gore tretirali samo je jedan slučaj mogućnosti da ljudi dođu u opasna polja — svjesno. Drugi slučaj je nesvjesna prisutnost ljudi u takvim poljima. Ovaj slučaj može nastupiti, na primjer, kod vožnje avionom, kad ovaj prolazi kroz snop antene jedne zemaljske stanice velike snage (4). Udaljenost u kojoj može doći do gustoće od 10 mW/cm², u snopu jedne antene ako je isijana snaga 500 kW a frekvencija 2,1 MHz, iznosi 7,3 km za antenu promjera 26 m. Ta udaljenost je 18,4 km za antenu promjera 64 m.

Vjerojatnost da bi zračno vozilo moglo doći u snop je produkt dviju vjerojatnosti:

— one po kojoj zračno vozilo za kojeg se zna da je ušlo u opasnu zonu može prolaziti kroz snop i

— one po kojoj zračno vozilo, zbog neupućenosti, u stvari »provaljuje« u ovakav prostor.

Prema detaljnim računima vjerojatnost da jedna zračna vozilica bude u ovakvom slučaju izvrgnuta gustoći većoj od 10 mW/cm², za kut veći od 10° iznad horizonta, je

$1{,}16 \times 10^{-8}$ za antene promjera 64 m
4×10^{-8} za antene promjera 24 m

LITERATURA

(1) CCIR Conclusion de la Reunion Interimaire de la Commission d'etudes IV, partie 1, Geneve 1968, str. 239 i dalje.

(2) CCIR Doc IV/59 od 14. VI 1968.

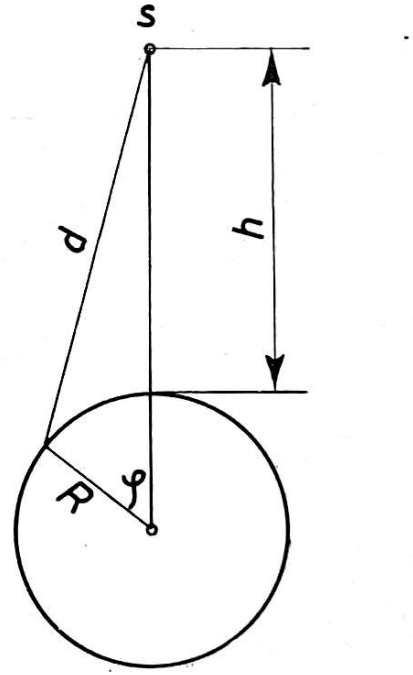
(3) *Quaglione:* Pericolosita delle microonde, Eletronica 1, 1967, str. 12.

(4) CCIR Doc IV/56. od 11. VI 1968, str. 27 i dalje.

11.

Vrijeme propagacije kod komunikacionih satelita

U izvjesnim područjima primjene komunikacionih satelita, posebice kod komunikacionih satelita u užem smislu, namijenjenih i prenosu onoga što nazivamo komercijalnom telefonijom, visina satelita može biti od znatnog utjecaja na kvalitet veze. Kašnjenje koje je posljedica konačne brzine propagacije elektromagnetskih valova i duljine puta među dvjema zemaljskim stanicama, vezanim preko satelita, može čak i kad se radi o samo jednom satelitu, kao posredniku veze, biti znatno (1).



Slika 11.1

Iz slike 11.1 vidimo da je općenito

$$d = \sqrt{(R + h)^2 + R^2 - 2\,(R + h)\,R \cos \varphi}$$

$$t_1 = \frac{2d}{c} \qquad (11.1)$$

c = brzina širenja elektromagnetskih valova (300 000 km/sek)

Za teoretske granice mogućih veza, kad se dakle zemaljske stanice nalaze na rubu područja s kojeg se satelit vidi na horizontu ($\Delta\varphi = 0^0$) i na velikom krugu, imamo

$$\cos\varphi = \frac{R}{R+h}$$

pa je onda

$$t_1 = t_{max} = \frac{2h}{c}\sqrt{1+\frac{2R}{h}} \qquad (11.1a)$$

Minimalno vrijeme propagacije imat ćemo za satelit u zenitu kad je $\varphi = 0$

$$t_1 = t_{min} = \frac{2h}{c} \qquad (11.1b)$$

Za razne *h* dane su duljine puta što ga elektromagnetski valovi moraju proći u tablici I. U istoj tablici imamo i vrijeme propagacije, dakle vrijeme kašnjenja za jedan smjer (od zemaljske stanice A do stanice B).

TABLICA I

h	2 d	l	t_1
35.871	83.500	18.090	278,5
30.000	71.600	17.750	244,3
25.000	61.400	17.425	204,5
20.000	51.200	16.890	170,6
15.000	40.360	16.120	134,5
10.000	30.160	14.920	100,5
5.000	18.840	12.450	62,7
km	km	km	ms

U tablici su navedene, radi usporedbe, i udaljenosti među istim zemaljskim stanicama na velikom krugu (l). Vidimo da vrijeme propagacije ide od 278,5 ms za satelite u stacionarnoj odnosno sinhronoj orbiti do 62,7 ms za satelite u cirkularnoj orbiti s $h = 5\,000$ km. Napomenimo usput da je kašnjenje na podmorskom kabelu na relaciji London—New York samo 35 ms (2).

CCITT daje mišljenje da kod međunarodnih telefonskih veza postoji potreba ograničenja vremena propagacije između dvaju pretplatnika. Niz pokusa koji je napravljen i koji nije dao uvijek jednoznačne rezultate, jer se radi o fizikalnom i psihološkom problemu, pokazao je — manje-više — da vrijeme propagacije neće kod abonenata izazvati nepovoljne reakcije, ako srednja vrijednost vremena propagacije u oba smjera ne pređe 150 ms. S porastom ovog vremena rastu i poteškoće u sporazumijevanju. Ove poteškoće kao što će to biti lako i pretpostaviti, dolaze u prvom redu odatle što smo navikli na razgovor bez zastoja s mogućnošću upadanja i neposrednog odgo-

varanja. Čekanje na riječi sugovornika predstavlja smetnju u razgovoru. Pojava odjeka vlastitog glasa koja se sada javlja sa zakašnjenjem adekvatnim dugačkom vremenu propagacije, kao vrlo neugodna ako je vrijeme dugačko, uklanja se doduše tzv. »echo suppressor«-ima* ali ovi, po principu na kojem su građeni, sprečavaju intervenciju sugovornika dok govor nije završen, jer govor sugovornika djeluje u stvari kao vlastiti odjek. Da bi se sve ovo izbjeglo preporuča se privremeno, da se kao granica za srednje vrijeme propagacije, ako postoji izvor jeke i ako se primjenjuje supresor, uzme

0 do 150 ms kao vrijednost prihvatljiva bez rezerve, 150—400 ms privremeno dozvoljeno, ako se kao kompenzacija za smetnje nađu druge prednosti, preko 400 ms kao neprihvatljiva vrijednost osim u posve izuzetnim prilikama.

Iz svega što je gore rečeno slijede dva jednostavna zaključka:

— Da će veze koje su po prirodi bilateralne, kao komercijalna telefonija, biti još moguće vršiti preko stacionarnog ili sinhronog satelita, ali u jednom samom skoku. Produženje će biti moguće ubacivanjem zemaljskih veza s kraćim vremenom propagacije. Iz istog bi se dalo zaključiti da će kod satelita na visini cca 15 000 km biti moguća 2 skoka, a onih na visini od 10 000 km tri skoka. Sve ovo vrijedi dakako uz pretpostavku da ostatak veze na Zemlji doprinosi neznatno ili ništa vremenu propagacije.

— S druge strane evidentno je da vrijeme propagacije u principu neće predstavljati problem kod veza koje idu u jednom smjeru — telegrafija, fototelegrafija — osim ako se radi o prenosu slika u boji sa separiranim bojama kad veliko vrijeme propagacije može izazvati nekorektnu registraciju — televizija. U ovom posljednjem slučaju koji će nas posebno zanimati, može međutim doći do poteškoća druge vrste. U slučaju prenosa TV-programa preko satelita bio je to u početku redovan slučaj da su se ton i slika prenosili različitim putevima. Razlika u duljinama puteva odnosno vremena propagacije može dovesti do pomanjkanja sinhronizma između slike i tona.

Čitav niz studija i pokusa kod kojih se je pomanjkanju sinhronizma između slike i pridruženog tona davalo razne vrijednosti u oba smisla izvršeno je u USA, Kanadi i Zapadnoj Njemačkoj. Rezultati pokusa omogućili su izvlačenje nekih općih zaključaka:

— promatrač je osjetljiviji na pomak slika-ton ako ton prethodi odgovarajućoj vizualiziranoj akciji,
— tolerancija koju gledalac dozvoljava ovisna je o prirodi akcije,
— pokusi su vršeni u najvećoj mjeri s engleskim kao pratećim tonom pa tolerancije mogu, u drugom jeziku, biti drugačije.

Konkretan zaključak je ipak: zakašnjenje tona prema slici koju prati do 140 ms izaziva kod 50% testiranih utisak pogreške koja se »tek primjećuje«, pomak tona pred slikom koju prati daje isti utisak kod istog procenta gledalaca kod iznosa od 70 ms (3).

U kategoriju pojava tipičnih za satelitske veze spadaju i posljedice relativnog gibanja satelita koje se manifestiraju kao Dopplerov efekt (4).

Relativno gibanje između prijemnika i odašiljača dovodi do promjene frekvencije u prijemniku (*f*) prema frekvenciji koja je emitirana (f_0). Ustanovljiva promjena frekvencije je

* Potiskivač odjeka.

$$\Delta f_o = f_o \frac{v_r}{c}$$

gdje je v_r relativna brzina gibanja satelita a c brzina svjetlosti. Frekvencija koju prijemnik prima je onda

$$f = f_o \pm \Delta f_o = f_o \left(1 \pm \frac{v_r}{c}\right) \qquad (11.2)$$

Pozitivni predznak znači da se satelit udaljuje a negativni da se primiče. Za v_r treba staviti radialnu komponentu brzine. Ako je brzina satelita vrlo velika, ako se približava brzini svjetla, moramo uzeti i relativistički član pa imamo:

$$f = f_o \frac{1 \pm \frac{v_r}{c}}{\sqrt{1 \pm \left(\frac{v_r}{c}\right)^2}} \qquad (11.2a)$$

Uticaj Dopplerovog efekta za razne službe različit je: zahtjevi su najozbiljniji za višekanalnu telefoniju a najmanji za prenos televizijskog programa. Ako su ispunjeni za telefoniju, ispunjeni su i za prenos podataka, telegrafiju i fototelegrafiju.

LITERATURA

(1) CCIR Documents dela XIe Assemblée Pleniere, Oslo 1966, Vol. IV, R 383, str. 369.

(2) *Wooster:* Satellite Communication Systems, Point-to-Point, oktobar 1968, str. 220 do 236.

(3) CCIR Doc IV/214 od 21. II 1969.

(4) Kao (1) R 214, str. 348.

12.

Višestruki pristup

1. OPĆENITO

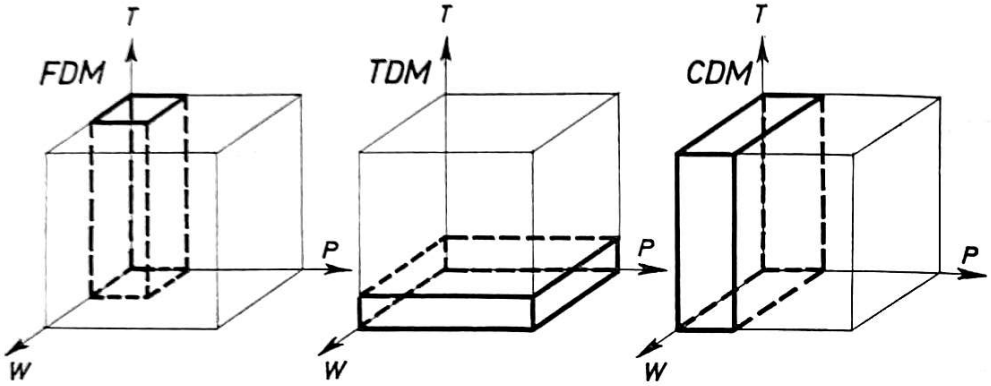
Kao što je to već više puta naglašeno, u satelitskim komunikacionim sistemima općenito, satelitska stanica je distribuciono čvorište samo dijelom slično relejnim stanicama u zemaljskim vezama. Dok se od zemaljske relejne stanice, i kad je kompleksnijeg tipa, traži u najboljem slučaju račvanje, dotle se od satelitske stanice traži da omogući međusobno povezivanje zemaljskih stanica na čitavom području pokrivanja satelita, s najvećom mogućom elastičnošću i podatnošću. Kod satelitskih veza postavlja se problem onog što nazivamo višestrukim pristupom, na poseban način, dakako kad se radi o satelitskim vezama u užem smislu.

Temeljitim iako očito neekonomičnim rješenjem problema višestrukog pristupa, moglo bi se smatrati ono u kome bi jedan vrlo veliki satelit vrlo kompleksno opremljen sadržavao za svaku zemaljsku stanicu po jedan kompletan terminal, na kome bi se vršila potpuna demodulacija a onda razdioba i prepajanje signala, te ponovna modulacija odgovarajućim signalima odgovarajućih drugih terminala. Kod zahtjeva koji se, u pogledu broja veza, postavljaju na satelite evidentno je da ovako rješenje nije ono kome treba težiti, pa se problem višestrukog pristupa i rješava danas na drugim principima. Iako je pri tome sačuvano načelo da se »interkoneksije vrše u orbiti« želi se imati malen jednostavan i pouzdan satelit, kompatibilan s današnjim mogućnostima: uz eventualne mogućnosti uticanja na signal, na samom satelitu, sve komutacije i usmjerenja signala vrše se sa Zemlje.

U sistemima s višestrukim pristupom, svi raspoloživi kanali ili jedan dio mogu biti dodijeljeni permanentno ili polupermanentno pojedinim parovima zemaljskih stanica koje učestvuju u dotičnom sistemu. Evidentno je, međutim, da će cijena komunikacije preko satelita padati s rastućim mogućnostima »razgrađivanja« ovakvih permanentnih zauzeća i ne samo to: ono će omogućiti i učešće zemaljskih stanica čije su potrebe na kapacitetima manje a često su upravo takve stanice one kod kojih satelitske veze dolaze do punog izražaja, kao jedine mogućnosti (geografski »velike« zemlje, zemlje u razvoju i slično). To su i razlozi da se kod novih savršenijih sistema teži za rješenjima koja bi omogućila da kanali budu na raspolaganju svim zemaljskim stanicama koje su u sistemu. Pristup satelitu može se pri tome izvršiti na nekoliko raznih načina. Neovisno o detaljima koji mogu dovoditi do razlika, svi ti razni načini dadu se svesti u tri kategorije (1):

razdiobu po frekvenciji (FDM)
razdiobu u vremenu (TDM)
cijepanje spektra po određenom kodu (CDM)

Razlike između ove tri osnovne kategorije u upotrebi vremena, spektra i snage satelita vide se trodimenzionalno prikazane na slici 12.1.1.



Slika 12.1.1

Svaka od ovih kategorija ima svoje prednosti i mane, pa izgleda da nema pristupa koji bi se danas definitivno i jednoznačno nametao.

Pogledajmo pojedine od njih redom (2), (3), (4).

a) *Metoda razdiobe po frekvencijama*

U ovom slučaju pretpostavlja se da svaka od radio nosećih frekvencija koju emitiraju pojedine zemaljske stanice zauzima točno dodijeljeni položaj. U satelitskom prijemnom dijelu svi se ovi nosioci pojačavaju istovremeno i šalju na drugim frekvencijama zemaljskim stanicama bez promjene tipa i stupnju modulacije. Zemaljska stanica selekcionira, filtriranjem, prije demodulacije nosioca ili nosioce koji je zanimaju t. j. nosioc ili nosioce dodijeljene drugim zemaljskim stanicama s kojima upravo hoće da ima vezu. Daljnje selekcioniranje može se odnositi na izbor telefonskih kanala, nakon prve demodulacije, koji tu stanicu zanimaju. Pojedini nosioci modulirani su kod ove metode frekventno.

Kao direktne posljedice metode pokazuju se potrebne samo dvije kontrolne funkcije: procjena gušenja na dijelu Zemlja-satelit za svaku stanicu da se omogući prilagođavanje potrebne snage i povremena kontrola dodijele kanala.

U drugom slučaju dolazi do promjene načina modulacije na satelitu samom. Na zemaljskoj stanici vrši se amplitudna modulacija s potisnutim nosiocem i jednim bočnim pojasom. Sve stanice upotrebljavaju isti virtuelni val nosilac ali svaka od njih okupira samo dani dio baznog multipleks pojasa. Na satelitskoj stanici primljeni signali kombiniraju se u kontinuirani bazni pojas a pretvarač na satelitu pretvara taj pojas u jedinstveni signal kojim fazno modulira novi nosilac za smjer satelit-Zemlja. Stanica na Zemlji identificira nakon demodulacije željene kanale.

Ova metoda traži da izlazna pojačala zemaljske stanice imaju vrlo veliku linearnost i da izlazna snaga bude vrlo točno odmjerena kako bi svi signali koji dođu na satelit imali jednaku gustoću snage. Što se tiče istraživanja mogućnosti veza razvijena su dva puta: ili se vrši konzultacija sa centrom kojem je dan zadatak dodjele kanala i nadzora (aservirani pristup) ili se svakoj stanici prepušta traženje slobodnih kanala za uspostavljanje veza (pristup s individulnom odlukom).

Praktičke mogućnosti iskorištavanja ove metode višestrukog pristupa dio su programa ATS u USA.

b) *Metoda razdiobe po vremenu*

Ova metoda, na prvi pogled vrlo privlačiva kao što je i multipleks po vremenu općenito kao ideja privlačiv, bazira se na cikličkom ukapčanju u proces rada satelita pojedinih zemaljskih stanica, što znači da se razdioba po vremenu vrši u radiofrekvencijama a multipleksiranje telefonskih kanala vrši se prethodno. Evidentno je da satelit sada prerađuje istovremeno samo signal s jedne zemaljske stanice pa izlazni signal ima konstantnu anvelopu a smanjenja izlazne snage izbjegnuta su u cijelosti.

Ovaj način razdiobe karakteriziran je trajanjem intervala rekurencije s jedne i trajanjem elementarnog intervala s druge strane. Svakoj zemaljskoj stanici dodjeljuje se jedan ili više elementarnih intervala. Interval rekurencije odgovara trajanju jednog kompletnog ciklusa emitiranja zemaljskih stanica.

Zemaljska stanica mora sama nakon demodulacije identificirati stanice s kojima drži vezu odnosno elementarne intervale koje tim stanicama odgovaraju. Za sam rad nije neophodno potrebno da sve zemaljske stanice imaju točno jednaku frekvenciju nosioca. Malene razlike u frekvencijama povećavaju samo potrebnu širinu pojasa sistema.

Kod ovog načina razdiobe za višestruki pristup svi vremenski intervali sadržani unutar intervala rekurencije na raspolaganju su da budu upotrebljeni, barem teoretski, od bilo koje stanice. Osnovni problem koji inače ova elastičnost u upotrebi, svojstvena sistemu, predstavlja je određena disciplina eksploatacije mreže.

c) *Metoda zajedničkog spektra*

U ovoj metodi signali koji dolaze od svih zemaljskih stanica u sistemu upotrebljavaju zajednički određeno područje vremena i frekvencija. Višestruki pristup omogućava poseban tretman signala koji omogućava prepoznavanje traženog signala među ostalima.

Što se tiče zahtjeva da se u sistem moraju uključiti zemaljske stanice s nejednakim osjetljivostima situacija je slijedeća:

U prvom slučaju s više nosilaca i bez promjene modulacije na satelitu, tražena visina isijane snage satelita bit će ovisna očito o najmanje osjetljivoj stanici u sistemu. Kapacitet pojedinih kanala ovisi očito o odnosu primljene snage nosioca prema temperaturi šuma sistema. Bilo bi poželjno da ovaj odnos bude jednak barem za zemaljske stanice koje bi trebale primiti signale na istom nosiocu.

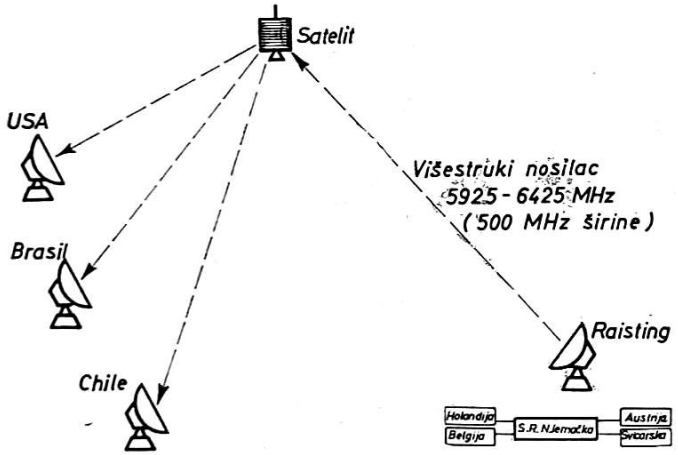
U drugom slučaju — više nosilaca s promjenom modulacije — ukoliko želimo da budu poštivani zahtjevi u pogledu šuma, u pojedinim kanalima, potrebno je da svi elementi sistema na Zemlji odgovaraju jednakim mini-

malnim zahtjevima neovisno o opsegu prometa, jer svaka od stanica na Zemlji mora moći primati kompletan signal kojeg satelit emitira.

U slučaju kad se problem višestrukog pristupa rješava razdiobom u vremenu ukupna snaga satelita raspoloživa je samo za signal jedne stanice u određenom vremenskom intervalu. Zbog toga je moguće u sistem uklopiti čitav spektar tipova zemaljskih stanica. Isti satelit odnosno pretvarač na satelitu može posluživati zemaljske stanice koje imaju različite karakteristike osjetljivosti i različite snage emitiranja uz uvjet da stanica emitira u uvjetima prilagođenim osjetljivosti prijemnika s kojim drži vezu. Budući, dalje, da sve zemaljske stanice moraju biti u stanju primati signal za sinhronizaciju intervala rekurencije, bit će svaka stanica u stanju komunicirati sa svakom drugom istog tipa usprkos postojanju većih i manjih stanica.

I u metodi zajedničkog spektra moguće je udružiti manje i veće stanice iz sistema samo je potrebno imati mogućnost intervencije na nivo snage relacije Zemlja-satelit kako bi se malenim stanicama osigurao dovoljan dio snage emitirane na dijelu satelit-Zemlja.

Sa satelitom INTELSAT III radi čitav niz stanica na zemlji od kojih su, kako je spomenuto u Evropi Goonhilly Down, Pleumeur Boudou, Raisting i Fucino. Uzmimo iz (5) kao primjer ukapčanje stanice Raisting u sistem INTELSAT III. Na slici 12.1.2 vidimo shematski prikazanu istovremenu vezu Raisting-a s USA, Brazilijom i Chile-om. Višestruki pristup omogućen je



Slika 12.1.2

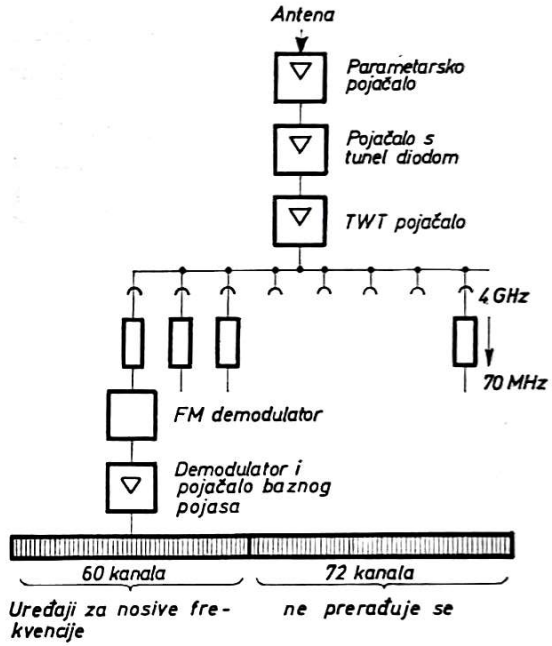
ovdje metodom razdiobe po frekvenciji. Kako se proces odvija vidimo shematski na slici 12.1.3. Multipleksiran na satelitu, signal dolazi u području 4 GHz u pojasu širokom 500 MHz. Nakon pojačanja dolazi čitav spektar na neku vrstu sabirnica gdje se odijeljenim oscilatorima izdvajaju na 70 MHz kanali koji odgovaraju pojedinim radiofrekventnim nosiocima. Demodulacija se vrši iz pojasa 70 MHz. U sistemu INTELSAT bazne grupe obuhvataju 132 kanala. Na prijemnoj stanici izdvajaju se podgrupe s onolikim brojem kanala koliki je dodijeljen pojedinoj stanici. Na prikazanom primjeru vidi se da su to 60 kanala iz područja 12 kHz do 292 kHz. Ostala 72 kanala koja su određena za Italiju i druge zemlje ne obrađuju se dalje. Grupa od 60 kanala ide na demultipleksere odnosno demodulatore i dalje pretplatnicima.

Sama organizacija prometa, dodjela kanala i slično, može se izvršiti na više načina. Tako, kako smo vidjeli, postoji:

— aservirani pristup koji predviđa traženje dozvole od centralne distribucione stanice za ulazak u sistem,

— pristup s individualnom odlukom u kome svaka stanica odgovarajućim sredstvima mora biti u stanju da prepozna bilo radio-električke kanale, bilo vremenske intervale koji su slobodni. Nakon toga ta stanica može upotrebiti slobodne kanale.

— slobodni ili samovoljan pristup moguć je kod metoda koju smo nazvali metodom zajedničkog spektra.



Slika 12.1.3

Japanska firma Nippon Electric Company u zajednici s Hughes Aircraft Company razvila je STAR (Satellite Telecommunication with Automatic Routing) sistem kojem je bila svrha da ograničen broj kanala iskoristi što racionalnije. Karakteristike ovog sistema su (6):

— Kanali nisu fiksno dodijeljeni specifičnim stanicama. Ako je dakle jedan kanal slobodan, on može biti iskorišten od druge stanice.

— Svaka zemaljska stanica ima određen broj kanala na raspolaganju. Kanal u kome se ne vrši prenos ne emitira se.

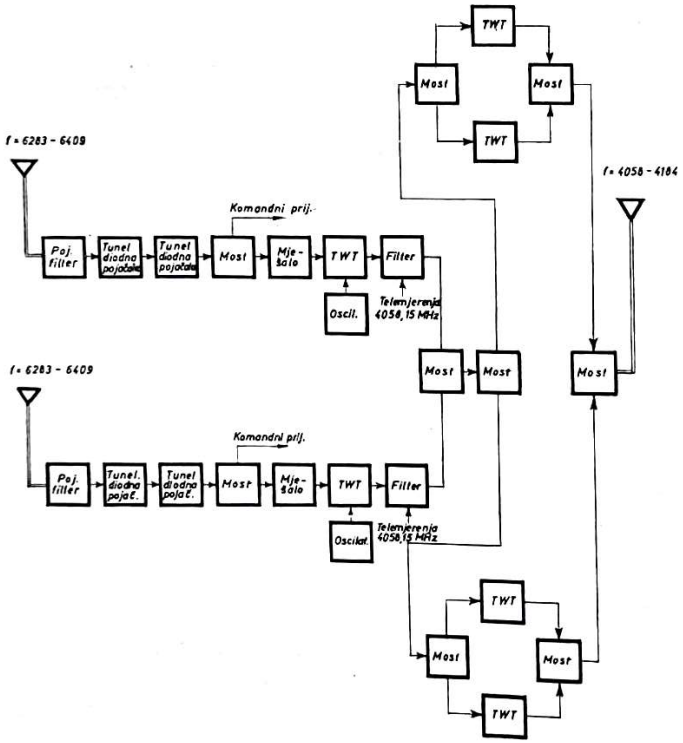
— Da bi se omogućilo ove posljednje primijenjen je »start-stop« sistem koji se brine za pravilno sprečavanje i osiguravanje emitiranja.

— Sve zemaljske stanice povezane su permanentno s kontrolnom stanicom preko veze za prenos podataka. Za ovu vezu je, da bi se osigurala što veća ekonomičnost, primijenjen vremenski multipleks sistem.

2. OPIS NEKIH IZVEDENIH KOMUNIKACIONIH SATELITA

ELEKTRONSKI DIO

Mogućnosti i problemi višestrukog pristupa postat će dijelom jasniji ako pogledamo pretvarače nekih izvedenih, eminentno komunikacionih satelita. Kao što smo već spomenuli do konca 1969. u pogonu bilo je 8 komunikacionih »civilnih« satelita iz sistema INTELSAT uz niz satelita iz familije Molnia, koji nisu svi isključivo komunikacioni sateliti u užem smislu. Od INTELSATOVIH odnosno COMSATOVIH satelita osim INTELSATA I poznatog kao »EARLY BIRD«, koji je imao ograničen pristup, svi ostali sateliti su sateliti s višestrukim pristupom. U sistemu INTELSAT na svaki radiofrekventni nosioc, za svaku vezu, dolaze 24, 60 ili 132 telefonska kanala odnosno 1 TV-kanal po nosiocu. Kao što smo već vidjeli, opslužuje jedan satelit veći broj stanica na Zemlji, pa u tu svrhu isijava i više radiofrekventnih nosilaca paralelno istovremeno. Zbog olakšanja dodjele frekvencija i želje da uređaji budu što jednostavniji upotrebljeni su i kod pretvarača na tipu INTELSAT II i kod onih INTELSAT III širokopojasna pojačala.

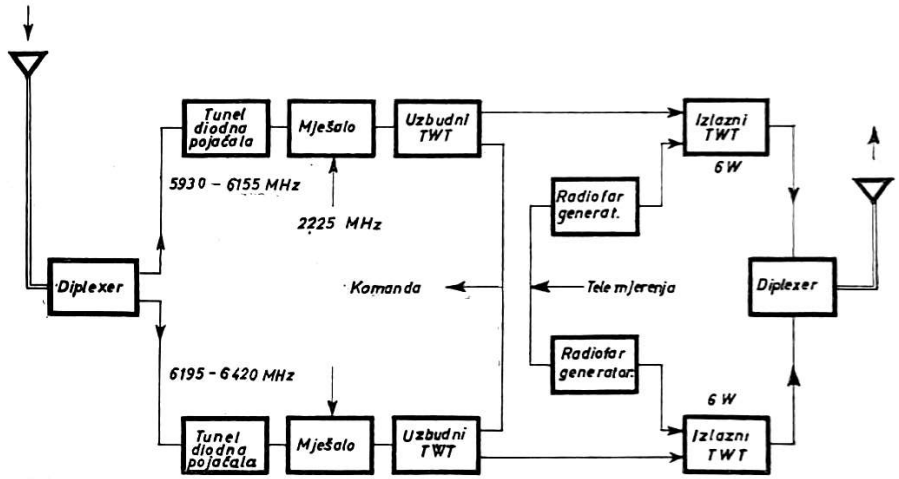


Slika 12.2.1

Blok shema pretvarača na satelitima tipa INTELSAT II vidimo na slici 12.2.1. Izlazna snaga dobiva se iz 4 TWT izlazna stupnja (á 6 W) spojena preko odgovarajućih mosnih spojeva tako da tri normalno rade istovremeno. Kod

prenosa jednog snopa vijesti ili TV-programa izlazni stupnjevi uzbuđeni su do zasićenja pa se dobiva i maksimalni EIRP. Ako se prerađuju dva ili više frekventno moduliranih nosioca, što je slučaj kod višestrukog pristupa, mora se uzbudna snaga reducirati tako da pojačala rade linearno. I u ovom slučaju će na žalost doći do intermodulacionih produkata. Lijek je daljnje snižavanje uzbuđenja što ima za posljedicu smanjenje isijane snage, stupnja djelovanja i — last not least — kapaciteta. Višestruki pristup u FM-u traži dalje i kontrolu snage zemaljskih stanica kako bi se prilagodila snaga satelita ovim korisnicima.

Izgleda da niz poteškoća otpada (8) primjenom digitalne vremenske razdiobe (TDMA). U ovom slučaju, kako smo vidjeli, svaka stanica na Zemlji emitirat će snop digitalnih informacija prema satelitu u vremenu koje joj je dodijeljeno i iskorištavati punu snagu satelita.

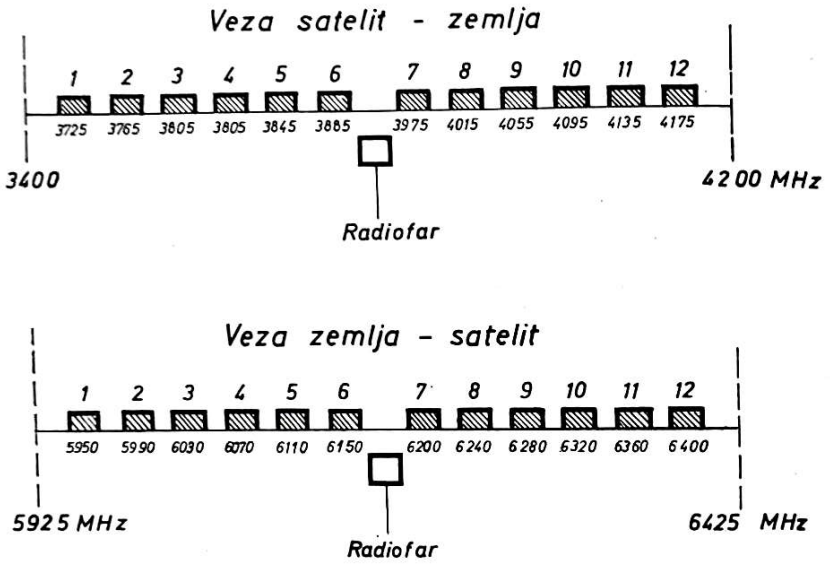


Slika 12.2.2

Pretvarači za satelite tipa INTELSAT III imaju ukupnu iskoristivu širinu pojasa 450 MHz, koju daju dva paralelna lanca, svaki sa širinom 225 MHz i snagom po 6 W. Ova širina pojasa i snaga omogućuju prenos 4 TV-kanala, dvaju kompletno zaposjednutih nosioca s po 1200 telefonskih kanala do 90 nosioca za višestruki pristup s po 24 telefonska kanala svaki ili ekvivalentne kombinacije. Principijelnu blok shemu pretvarača vidimo na slici 12.2.2 (7). Signali dolaze na satelit u 2 pojasa širine 225 MHz i to na frekvencijama 5930—6155 MHz i 6195—6420 MHz. Između njih sadržan je pojas od 40 MHz koji osim za zaštitu služi i za prenos komandnih signala. Nakon prijema, signale iz antenskog sistema filter diplekser razdvaja u dva lanca u kojima se vrši linearno pojačanje serijom široko-pojasnih, niskošumnih pojačala s tunel-diodama. Signal snage — 95 dbW na ulazu u seriju pojačala daje zasićeni izlaz od 6 W, što znači da je pojačanje pretvarača 102,8 db.

Signali se konvertiraju na nižu frekvenciju uz pomoć oscilatora na 2225 MHz i širokopojasnog mješala, pa se tako ide na dva pojasa 3705—3930 MHz i 3970—4195 MHz.

Kao što se sa slike vidi, glavno pojačanje se vrši u kaskadi pojačala s TWT. Nakon prvog stupnja izdvaja se filtriranjem i uklanja iz komunikacionog kanala, u užem smislu, komandni signal. Signali za telemjerenja modulirani su fazno i dva signala uvrštavaju se u centralni, 40 MHz široki, pojas i dodaju izlaznom TWT pojačalu. Ovi signali omogućuju između ostalog i praćenje satelita prilikom njegovog ubacivanja u orbitu. Oba komunikaciona kanala spajaju se preko dipleksera i upućuju na zajedničku antenu.



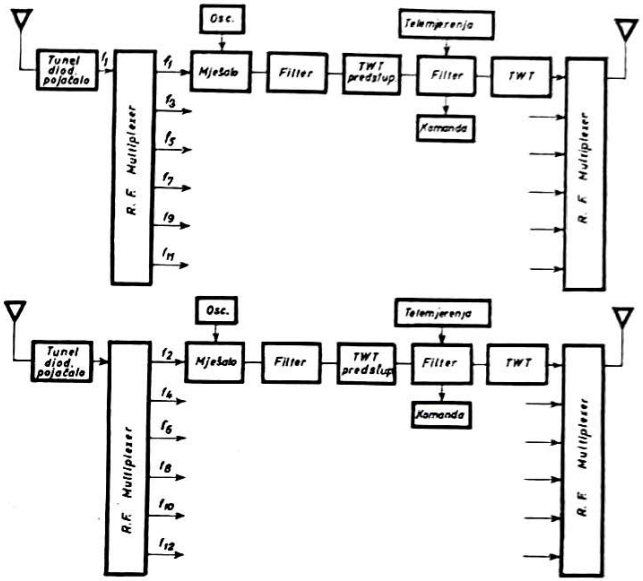
Slika 12.2.3

Sateliti tipa INTELSAT IV koji se sada pripremaju za stavljanje u pogon, imat će veći broj (12) pretvarača i znatno manje širine pojasa (40 MHz nominalno i 35 MHz korisno). Raspored frekvencija za pojedine pretvarače dan je na slici 12.2.3. Snage radiofrekventnih nosilaca bit će znatno veće a antene s uskim snopovima osiguravat će veći dobitak. Budući da će broj nosioca u svakom pretvaraču sada biti manji, moći će TWT cijevi raditi bliže zasićenju pa prema tome i s boljim stupnjem djelovanja. Satelit će očito uz ove uvjete biti znatno složeniji, pa će se i zahtjevi na pouzdanost elemenata i cjeline znatno povećati.

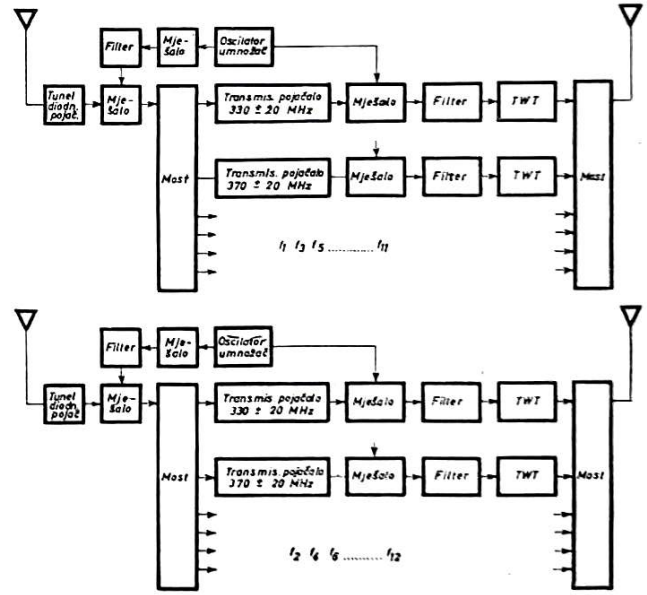
Za INTELSAT IV razmatrane su dvije principijelne načelne sheme koje vidimo na slici 12.2.4 odnosno slici 12.2.5. Odabran je sklop s jednostavnim pretvaranjem frekvencije (sličnim onome kod INTELSATA III) no nije isključeno da definitivni sklop pretrpi neke izmjene.

Antena na satelitima tipa INTELSAT I i II u dijelu za emitiranje, ima dobitak od cca 9 db, dok je dobitak antene u prijemnom dijelu od 4—5 db. Antene su širokopojasne s kružnom karakteristikom. Kod INTELSATA III koji je stabiliziran žiroskopski (cca 100 okretaja na minutu) dobitak antene, koja mehanički rotira s istim brojem okretaja u protivnom smjeru, iznosi kod

prijema i emitiranja cca 13 db. INTELSAT IV imat će, kako smo spomenuli, antene sa širokim i uskim snopom: kod širine snopa 4,5° dobitak će, uz 4 GHz, biti oko 29 db. Osam, od ukupno 12 pretvarača, moći će se povezati na antene s širinom snopa 4,5° (oni s frekvencijama 1, 3, 5 i 7 na jednu i s frekvencijama 2, 4, 6 i 8 na drugu antenu).



Slika 12.2.4



Slika 12.2.5

(1) *F. Assadourian, Jacobi:* Multiple-Access Consideration for Communication Satellites, RCA Review, vol XXVII, br. 2, juni 1966, str. 179 do 198.

(2) CCIR Conclusions de la Reunion Interimaire de la Commission d'etudes IV, Geneve 1968, Partie 1, str. 129 do 145 i str. 169 do 189.

(3) *Wright:* Modulation methods for Multi-Station Satellite communication System, Point to Point, februar 1963, str. 37 do 52.

(4) *Worster:* Satellite Communication system — Baseband Multiplex and Switching Requirements, Point-to-Point, oktobar 1968, str. 220—236.

(5) *Limann:* Richtfunk um den Erdball, Funkschau N° 22, 1969, str. 777—780.

(6) ***: Star System, Nippon Electric Company, Tokyo 1965.

(7) *Dawson:* Signalumsetzer in Nachrichten-satelliten, Elektrisches Nachrichtenwesen, Bd 44, N° 4, 1969, str. 343—352.

(8) *F. Gicca:* Communications Satellites, Electronics — juli 1969, str. 23—27 i 66—67 i Electronics — august 1969, str. 44—48 i 71.

13.

Radiodifuzni sateliti

1. OPĆENITO

Iako smo u svemu što je do sada bilo rečeno govorili o telekomunikacionim satelitima u užem i širem smislu, podrazumijevajući pod ovim posljednjima radiodifuzne satelite, potrebno je ovdje konstatirati da je pri tome formalno, svjesno, napravljena jedna pogreška: međunarodni radiopravilnik ne smatra radiodifuzne satelite, odnosno servis osiguran ovakvim satelitima, telekomunikacionim satelitima odnosno telekomunikacionim servisima.

Radiodifuzne satelitske službe — a definicija je dovoljno široka da obuhvati i službe radija i one televizije — po spomenutom su Pravilniku »spacialne službe kod kojih se signal emitira ili reemitira refleksijom s objekta u orbiti oko Zemlje, a taj signal namijenjen je direktnom prijemu po širokoj publici«. Kod ovakve će, dakle, službe, u principu, odašiljač na Zemlji emitirati određeni program prema satelitu a ovaj će ga, sa svoje strane, emitirati prijemnicima kod privatnih korisnika u jednom, općenito, vrlo širokom području Zemlje, bilo kao aktivni bilo kao pasivni satelit.

Satelit koji posreduje u prenosu jednog programa namijenjenog zemaljskim radiodifuznim mrežama, ne osigurava u gornjem smislu radiodifuzni servis i spada u telekomunikacione satelite »u užem smislu«.

Na Interimnom zasjedanju Studijske komisije X i XI CCIR-a, u Majorci 1968 godine (1), predložene su neke definicije koje bi, u vezi s granicama postavljenim u spomenutom Pravilniku, objasnile što sve spada u pojam satelitske radiodifuzije. Istom prilikom postavljene su definicije telekomunikacionih servisa satelitima za potrebe radiodifuzije. Predloge je studirala kasnije i CCIR Komisija IV, koja se je, kako znamo, posebice bavila spacialnim sistemima i radioastronomijom i koja je definicije usvojila, s malenim izmjenama. Po spomenutom dokumentu razlikovali bi u radiodifuznom satelitskom servisu tri kategorije:

— Glavni servis koji pretpostavlja gustoću toka snage toliku da je direktni prijem moguć individualnim instalacijama pretplatnika, s kvalitetom usporedivim onom koji osiguravaju službe s odašiljačima na Zemlji.

— Rubni servis kod kojeg je gustoća toka snage ograničena ali dovoljna za direktni individualni prijem kao i gore, s prihvatljivim kvalitetom, u zonama s manjom gustoćom stanovništva, koje su slabo ili nikako pokrivene drugim sredstvima, a imaju povoljne uvjete za prijem.

— Servis za zajednički prijem kod kojeg je gustoća toka limitirana a signali namijenjeni kolektivnom prijemu grupa gledalaca odnosno slušalaca ili distribuciji s jednog ili više mjesta.

Telekomunikacioni servisi za radiodifuziju podijeljeni su u dvije skupine:

— Servis za direktnu distribuciju koji omogućava takvu distribuciju iz jednog ili više izvora, odašiljačima na Zemlji, radiodifuznih programa i eventualnih ostalih signala potrebnih za eksploataciju tih odašiljača.

— Servis za indirektnu distribuciju koji na sličan način osigurava napajanje pojedinih stanica na Zemlji, koje onda vrše daljnju distribuciju programa odašiljačima. I u ovom slučaju programske informacije mogu biti popraćene ostalim informacijama potrebnim za normalnu eksploataciju.

Istom materijom bavila se je konačno i mješovita komisija X/XI, 1969. u Genevi, bacajući težište na terminologiju (2). Izgleda da ni definicije ni sadržaj nisu, ni sada, najsretnije odabrani, no neovisno o tome, dva su faktora koji će utjecati na formiranje satelita odnosno satelitskog sistema, kad se radi o radiodifuznom odnosno televizijskom satelitu: područje koje će on pokrivati i snaga s kojom će moći odnosno morati raspolagati, da bi dano područje mogao pokriti kvalitetno i bez smetnji drugim različitim ili sličnim službama.

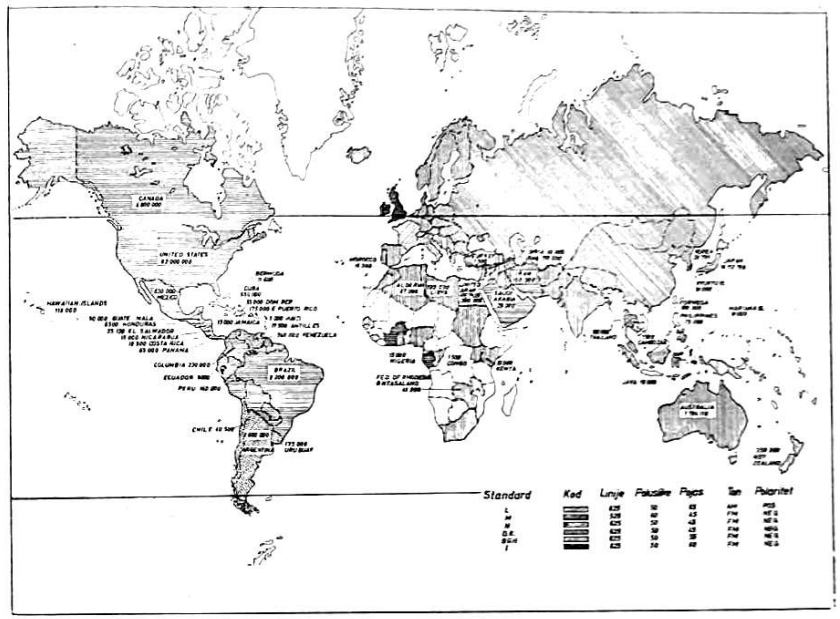
Vidjeli smo ranije da su mogućnosti stacionarnog satelita, a o takvim bi ovdje u prvom redu trebalo govoriti, ogromne, ako se radi o području pokrivanja. To je, uostalom, jedna od prednosti koja se pridaje emisiji putem satelita, prednost koju je već A. C. Clarke istaknuo, kad je dao prvu ideju o stacionarnom satelitu, prednost koja — uostalom — tehnički realno postoji. Pokušamo li, međutim, analizirati te velike mogućnosti, vidimo brzo da su one, praktički, prilično dovedene u pitanje. Ima za to niz razloga.

Stacionarni satelit može teoretski pokriti površinu od cca 216,000.000 km², dakle oko 42% ukupne površine Zemlje: tri ovakva satelita, kako smo vidjeli, pokrivaju gotovo čitavu naseljenu Zemlju. Između krajnjih točaka područja pokrivanja jednog satelita postoji vremenska razlika od 8 sati. Zajednički program za ovakvo jedno područje nije, sigurno, jednostavan problem. Postoji, naime, ograničeno vremensko razdoblje u kojem se može s uspjehom prezentirati jedan tip programa, a i ono se mijenja od kraja do kraja i ovisno je o lokalnim navikama. Vremenska razlika od osam sati znači, u najmanju ruku, da će na primjer, jedan program predviđen za kasne večernje sate doći u drugi dio područja vrlo rano poslijepodne. Vremenski problemi u ovom smislu, bit će sve manje interesantni, što je područje pokrivanja manje.

Na svijetu postoji u upotrebi kakvih šest tisuća jezika, što nesumnjivo ne olakšava emitiranje jednog programa na velikim površinama. Ponekad se, čuju i ideje da je problem jezika najjednostavnije riješiti ako ga se kao problem ignorira, što bi, bez napuštanja vlastitih jezika, trebalo dovesti do usvajanja jednoga kojeg bi razumjeli svi. Na dugi rok ovo bi, možda, moglo biti rješenje kad bi se, dakako, mogli dogovoriti koji bi to jezik morao biti. Na drugi bi se način problem mogao rješavati svođenjem na nekoliko poznatih jezika, no i ovdje će vjerojatnost da se jedno ovakvo rješenje, tehnički relativno jednostavno i prihvatljivo, provede kao rješenje, biti to veća što je manja površina područja koje satelit pokriva.

Danas, dalje, postoji oficijelno (3) 14 raznih standarda za monokromatsku televiziju, koji su u upotrebi u raznim zemljama. Iako ponekad razlike nisu

velike, prijemnik rađen za jedan standard neće zadovoljavati djelomično ili uopće, ako prima signal s drugim standardom. Ako se stvar pokuša pojednostavniti, kako je to napravljeno u (4), gdje su kao karakteristike standarda uzeti samo broj linija, broj poluslika, širina pojasa, polaritet modulacije slike i način modulacije tona, pa je ostalo samo šest grupa standarda, problem se ne



Slika 13.1.1

pojednostavnjuje mnogo, jer su, prema slici 13.1.1, na primjer, Evropa i Afrika, a u velikom dijelu i Azija, podijeljene na više standarda. U okviru mogućnosti pokrivanja jednim stacionarnim satelitom, mogao bi zadovoljavajuće rješenje naći, uglavnom, kontinent Amerika sa svojih cca 68,000.000 prijemnika u Sjevernoj i cca 2,500.000 televizijskih prijemnika u Južnoj Americi, koji imaju isti standard. No i uz ovakvu situaciju spomenuti dokument (4) predviđa postavljanje pet satelita s ograničenim zonama pokrivanja ali i stanovita manja prilagođenja standarda, odnosno prijem bistandardnim prijemnicima.

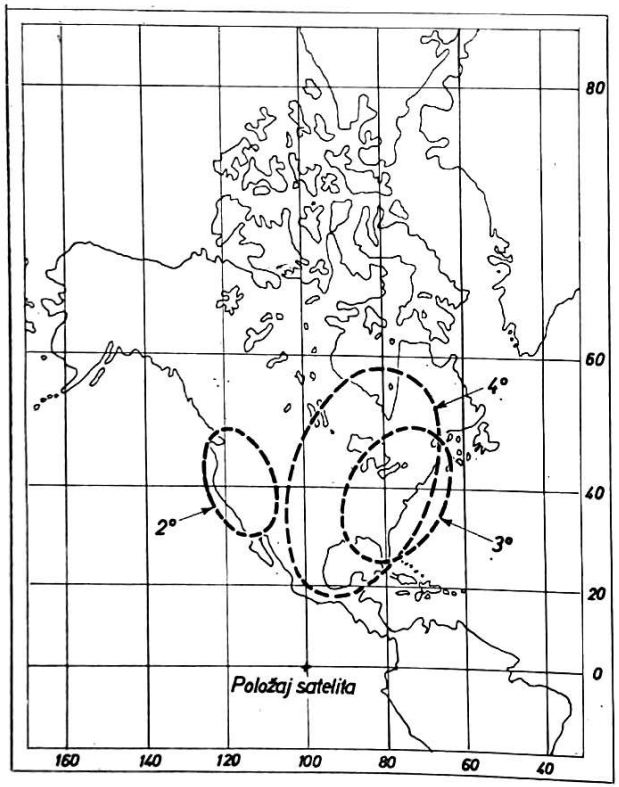
Situacija se bitno pogoršava uvođenjem televizije u boji, jer se na izvjesnim dijelovima zemljine površine, posebice u Evropi i Africi, razlikama u standardima superponiraju i razlike u sistemu boje. Uz ove uvjete, pokrivanje teritorija koji odgovaraju geometrijskim mogućnostima pokrivanja stacionarnim satelitima, postaje vrlo dubiozno, ako se radi o stvarnim davanjima mogućnosti prijema širokom krugu gledalaca i ne želi doći do neprihvatljivo skupih i tehnički vanredno složenih sistema, koji dovode u pitanje ideju kao takovu.

Uz gornja razmišljanja, nije čudo što se pojavljuju tendencije pokrivanja površina koje su znatno manje od one koja odgovara mogućnostima geostacionarnih satelita, ali površina koje, s gore spomenuta tri aspekta, tvore zatvorene ili zatvorenije cjeline. Pri tome se ne izbjegavaju ni rješenja pokrivanja više ovakvih manjih — odijeljenih — površina jednim satelitom, barem kao

nosiocem relejnih stanica kojih može biti više — rješenje koje je, kako smo vidjeli, usvojeno i kod najnovijih generacija komunikacionih satelita konzorciuma INTELSAT.

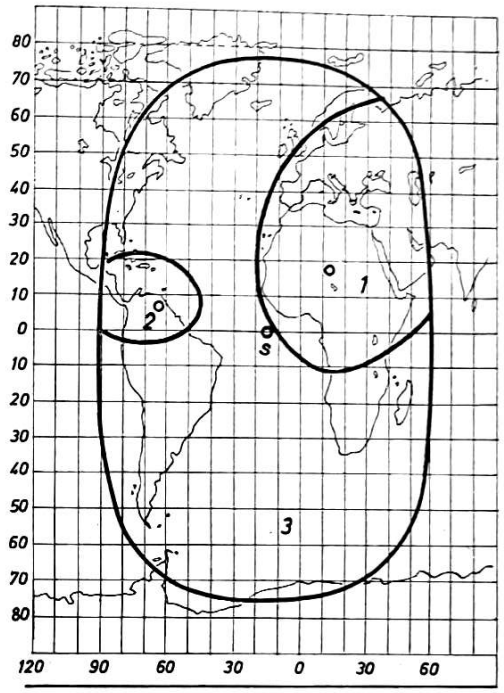
Prelaženjem na pokrivanje manjih područja vraćamo se, uostalom, na ono što je, iz tehničkih razloga, u prvim počecima opskrbe televizijskim programom vrlo velikih površina, dakako drugim sredstvima, bilo rješenje. Podsjetimo se na prve pokušaje ove vrste izvedene u USA i SSSR (1957). Za onaj iz USA upotrebljen je avion koji je kružio na cca 7 km visine i na dva kanala, u području 800 MHz, opskrbljivao je televizijskim programom površinu od oko 200.000 km² — državu Indiana i dijelove okolnih država.

Danas se, kao tipične za pojedine potrebe televizije, uzimaju površine koje odgovaraju širinama snopa (na 3 db) satelitskih antena od 1,4°, 2,5° i 5°, s promjerima zona na ekvatoru od 1000, 2000 odnosno 3.200 km (5), (6). U ovisnosti o smjeru centra snopa, dakle u ovisnosti o geografskoj širini centra zone, kružni oblik prelazi u eliptički s odnosima velike i male osi te nagibom velike osi ovisnima o geometrijskim odnosima centra zone i položaja satelita. U Dodatku vidimo tebele koje, za neke specijalne slučajeve pokazuju ove odnose. Neke tipične mogućnosti, uz snopove širine 1,4° vidimo na slici 7.3.6 u poglavlju 7.3 (7) za centralni dio Evrope. Kako izgledaju mogućnosti za USA, sa stacionarnim satelitom lociranim iznad 100° zapadne duljine, vidimo na slici 13.1.2 (5).

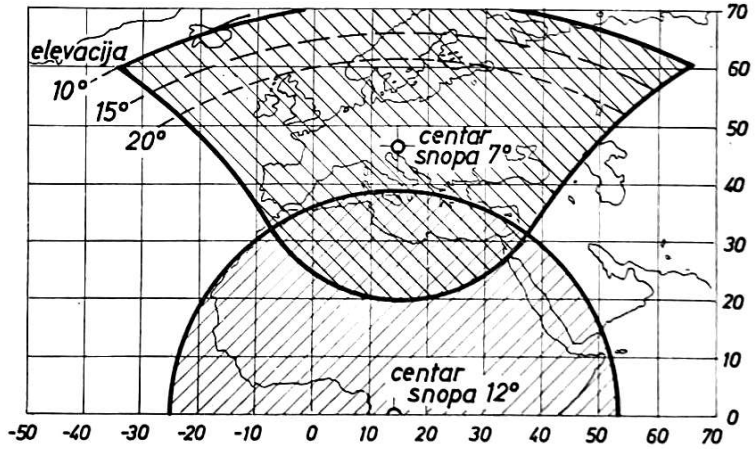


Slika 13.1.2

Napomenimo da je i za drugo područje primjene satelita u radiodifuzne svrhe — prijenos programa zemaljskim radiodifuznim mrežama — napravljeno već niz projekata sa snopovima koji su znatno uži od mogućih čak i onda kad se radi o stacionarnim satelitima, koji bi, prema tome, imali znatno veće mogućnosti. Navedimo kao primjer projekat poznat pod imenom Simfonija



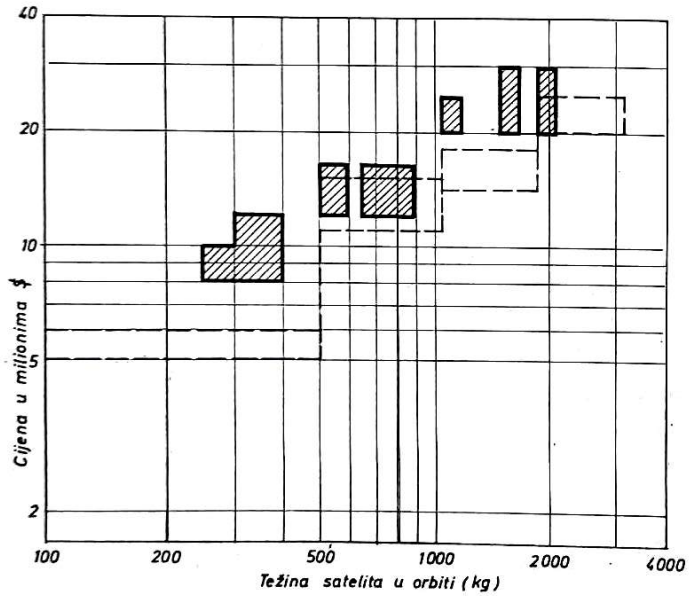
Slika 13.1.3



Slika 13.1.4

(Symphonie) (8) u kome su uz mogućnost maksimalnog pokrivanja (otvor snopa 17,2°) predviđene mogućnosti pokrivanja snopovima 4° i 10,5°. Zone pokrivanja vide se na slici 13.1.3. I drugi evropski projekat poznat kao Eurovizijski satelit ili satelit »Eurafrica«, predviđa dvije antene: jednu s otvorom snopa 7° a drugu s otvorom 12° (pokrivanje kao na slici 13.1.4) (9).

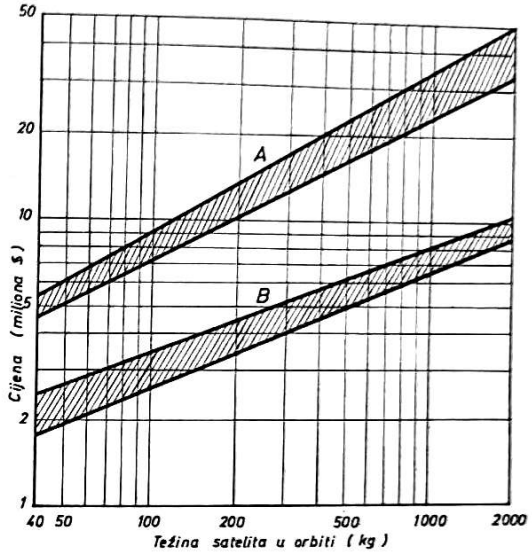
Iako se, dakle, prelaz na manje područje pokrivanja pokazuje kao potreba i predstavlja kod rješavanja niza tehnoloških problema niz prednosti, povlačit će on kao pojava za sobom i stanovite nove probleme: veći broj satelita potreban da riješi problem pokrivanja nametat će rješavanje pitanja maksimalne snage prema satelitu i separacije satelita odnosno njihove lokacije na stacionarnoj orbiti (evidentno je da dolaze u obzir samo geostacionarni sateliti). Slični problemi postavljat će se i u smjeru satelit-Zemlja. Nesmetan međusobni rad i neometan rad drugih službi, tražit će znatno veće napore i koordinaciju kod planiranja. Uspjeh u rješavanju ovisit će, dakako, u prvom redu, o uspješnom rješavanju već ranije nabačenog problema frekvencija, odnosno frekvencijskih područja, koja će moći biti dodijeljena ovim službama. Za Evropsku Zonu, koja ima svoje specifičnosti i koja će sigurno, u ovom pogledu, morati biti tretirana na specifičan način, u toku je niz studija orijentiranih uglavnom ili isključivo na pojas 12 GHz. Bogata bibliografija tih studija dana je u (10).



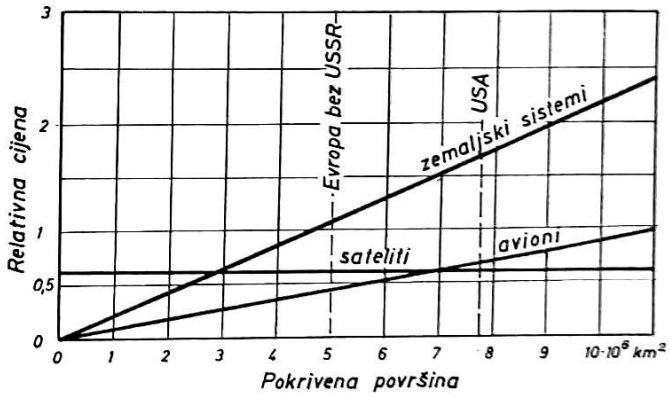
Slika 13.1.5

Problematika vezana na radiodifuzne satelite predmet je razmatranja i čitavog niza drugih dokumenata, izrađenih u okvirima raznih međunarodnih organizacija i organizama, spomenutih već dijelom u ovom i ranijim poglavljima. Tome je, kako je spomenuto, razlog činjenica da je ono, što se na prvi pogled ne bi očekivalo, problem radiodifuznih satelita, problem koji neobično zanima zemlje ogromnih površina i broja stanovnika, koje se nalaze u razvoju

i koje bi, u nizu slučajeva, trebale svoje osnovne potrebe u radiodifuziji i televiziji — prvenstveno edukativnog tipa — rješavati ovim najmodernijim sredstvima komunikacija. Od niza projekata ove vrste — spomenimo onaj za Iran (11) i onaj za Indiju (12) — neki su predmet detaljnih studija a neki su (Indija) već znatno uznapredovali.



Slika 13.1.6

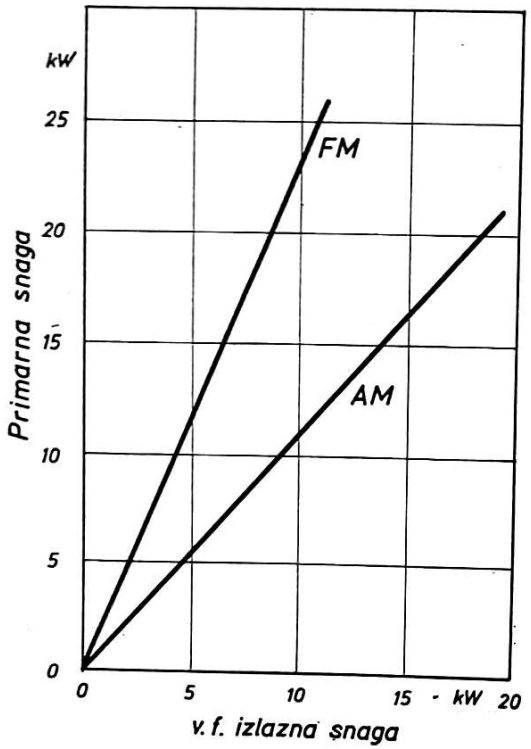


Slika 13.1.7

Problem koji se ovdje pojavljuje kao osnovni i koji je posebice važan jer se radi, u prvom redu, o zemljama u razvoju, u Aziji, Africi, Latinskoj Americi, vezan je na cijenu raznih projekata. Na taj problem stavljeno je težište i na posljednjem plenarnom zasjedanju CCIR-a.* Iz dokumenta (13) koji je

* N. Delhi, od 21. I do 11. II 1970.

prezentiran na ovom zasjedanju uzeti su podaci sa slike 13.1.5. Oni pokazuju cijenu stavljanja u orbitu satelita kao funkciju njihove težine. Pretpostavljeno je da je težina u orbiti jednaka polovini težine kod lansiranja. Punom linijom dani su odnosi iznešeni u (5) a crtkano je dano mišljenje eksperata na sastanku u Genevi.* Kao što se na slici vidi, postoje »rupe« koje su posljedica činjenice da su rakete vektori normalno konstruirane da bi odgovarale određenim zahtjevima, pa su prema tome i dimenzionirane. Potrebno je, dalje, naglasiti da su baza za ove cijene, cijene raketa proizvedenih u USA. Cijena inače obuhvata samu raketu, procenat te cijene koji se odnosi na godišnje troškove eksploatacije, konstrukciju, pokuse i troškove baze za lansiranje. Cijene će očito, biti ovisne o momentu lansiranja. Na slici 13.1.6 iz istog dokumenta (5) dana je cijena razvoja opet u ovisnosti o težini satelita u orbiti. Krivulja A prikazuje troškove razvoja, a krivulja B jediničnu cijenu.

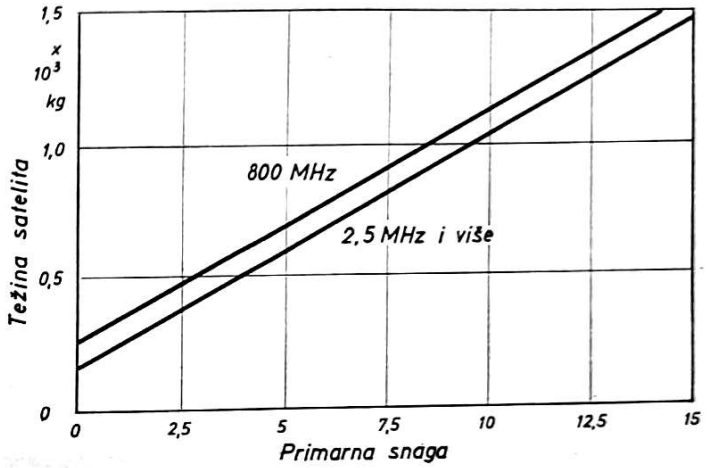


Slika 13.1.8

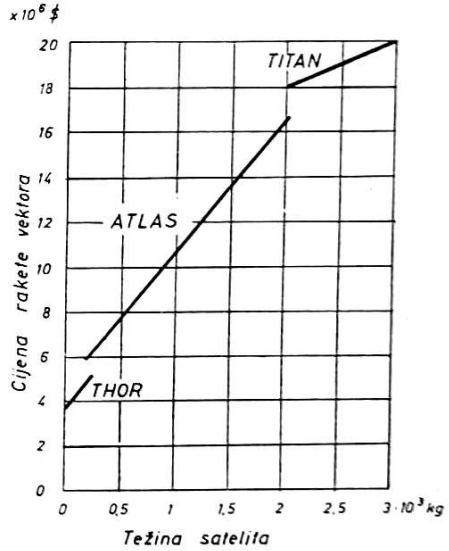
Napominjemo ovdje dalje, da je prije gornjih, na izvjestan način apsolutnih, cijena niz dokumenata tretirao problem odnosa koji za ovo naše razmatranje nije od manje važnosti. U (14) dani su vrlo interesantni odnosi relativnih cijena pojedinih mogućih ili teoretski mogućih načina pokrivanja za površine do 11.10^6 km² (slika 13.1.7). Interesantna je konstatacija da je već kod površina od 3.10^6 km² cijena zemaljskih sistema za emitiranje TV-programa jednaka cijeni rješenja sa satelitom (sjetimo se da je to približno površina Argentine, Indije, da je Brazilija skoro tri puta veća, Kanada više od

* Geneva, od 14. do 16. I 1970.

3 puta, Sjedinjene Države 2,5 puta itd.). Pri tome nije uzeta u obzir činjenica da bi za pokrivanje nekih područja tih veličina vrijeme trajanja izgradnje zemaljske mreže jednakog kvaliteta trajalo nedozvoljeno dugo. Na nekim međunarodnim sastancima, na kojima je bila tretirana ova problematika, čula su se i mišljenja, bazirana na računima, da bi već za SR Njemačku »satelitsko« rješenje, uz gustoću pokrivanja kakvu ona ima, bilo jeftinije od onog izgradnjom zemaljske mreže.



Slika 13.1.9



Slika 13.1.10

Relativni odnosi, rezultat niza opsežnih studija, dani su u (15). Na slici 13.1.8, uzetoj iz tog dokumenta, vidimo odnose između snaga napajanja (primarna snaga) i v. f. izlazne snage kod satelitskih odašiljača u slučaju primjene

amplitudne odnosno frekventne modulacije. Na slici 13.1.9 dan je odnos težine prema primarnoj snazi za frekvenciju 800 MHz (radi se o američkom dokumentu) i za frekvencije iznad 2,5 MHz, dok je na slici 13.1.10, konačno, dan odnos težine satelita prema cijeni rakete, pri čemu su u obzir uzeta tri tipa raketa (dokument je rađen u toku 1967.)

LITERATURA

(1) CCIR Doc X/112 — XI/190 od 7. V 1968.

(2) CCIR Doc X/247 — XI/262 od 15. IX 1969.

(3) CCIR Documents de la XI^e Assemblée Pleniere, Oslo 1969, Vol V.

(4) CCIR Doc IV/206 — XI/134 1966.

(5) UN Doc A/AC. 105/51, februar 1969, Annexe 3, str. 2.

(6) CCIR Conclusions de la Reunion Interimaire de la Commission d'etudes IV, Geneve 1968, str. 316 i dalje.

(7) UER Doc Com T (K): Utilisation of SHF for Broadcasting, 1969.

(8) ***: Le projet Symphonie, Memoire R 129, UN Conference on the Exploration and Peaceful Uses of Outer Space, Beč 1968.

(9) *Hansen:* Eurovision — un projet Satellite pour Eurovision, Journal des Telecommunications VIII/1968, str. 413—417.

(10) UER Com T (K) 197, maj 1970.

(11) *Bollay et al.:* Plan pour l'education en Iran au moyen de programmes de television par Satellite (1969.

(12) UNESCO Com (WS) 51: Preparatory study of a pilot project in the use of satellite communication for national development purposes of India, 5. III 1968.

(13) CCIR Doc PLEN. 7, N. Delhi — 27. I 1970.

(14) *Strehl, Fiedler:* Fernsehversorgung grosser Gebiete durch Satelliten, Frequenz Bd 20, 1969. N° 7, str. 222—233.

(15) *Haviland:* Space Broadcasting, UN Conference on the Exploration and Peaceful Uses of Outer Space, 3. juni 1968, Doc A/Conf. 34/I. 4.

2. PRORAČUNI I PRIMJERI PRORAČUNA

Ako su distribucija i emitiranje radiodifuznog programa putem satelita postali poželjni ili čak potrebni, realizacija će stvarno biti ovisna o tehničkim mogućnostima. Da vidimo kakvi se zahtjevi na satelit mogu postavljati, moramo vidjeti što se stvarno od uređaja na satelitu i onih na Zemlji traži i očekuje. Najkorisnije je zato pogledati kako izgleda energetska bilanca u lancu emisija — prijem, uz određene parametre, kojima je specificiran kvalitet prenosa. Velika većina izraza koje ćemo upotrijebiti kod određivanja pojedinih pozicija u našoj bilanci, već je poznata iz prethodnih poglavlja, no mi ćemo ovdje dati jedan kompletan pregled, uz potrebne dopune, i na temelju njega nekoliko primjera koji se dijelom, kao već klasični, pojavljuju u raznim dokumentima koji tretiraju problematiku radiodifuzije preko satelita.

Kod satelitskih sistema, jednako kao i kod radiorelejnih veza na zemlji, bit će, uz pretpostavku uvjeta propagacije jednakim onima u slobodnom prostoru, primljena snaga nosioca dana sa

$$p_c = \frac{p_T \cdot g_T \cdot g_R}{l}$$

gdje je

p_T = snaga odašiljača u W
g_T = dobitak antene odašiljača (faktor)
g_R = dobitak antene prijemnika (faktor)
l = gušenje propagacije između obiju antena (faktor)

ili

$$P_c = P_T + G_T + G_R - L \quad \text{dbW} \tag{13.2.1}$$

gdje je

P_T = snaga odašiljača u dbW
G_T = dobitak antene odašiljača u db
G_R = dobitak antene prijemnika u db
L = gušenje propagacije među dvjema antenama u db

odnosno

$$G = 20 \log D + 20 \log f - 41{,}48 \text{ db} \tag{6.5}$$

$$L = 20 \log d + 20 \log f + 32{,}46 \text{ db} \tag{13.2.3}$$

uz

f = frekvencija u MHz
d = udaljenost među antenama u km
D = promjer otvora antene u metrima.

Za brzo računanje vrijednosti iz izraza (13.2.3) imamo jedan jednostavni diagram u Prilogu (sl. 7).

Kod proračuna odnosa signal/šum, mora šum na ulazu u prijemnik uključiti doprinos šuma iz svih izvora (kozmički šum, šum antene i valovoda i šum prijemnika). Snaga šuma normalno se, kako smo vidjeli izražava temperaturom šuma. Snaga šuma dana je sa

$$p_n = k\, T^{(o)} b$$

gdje je, kako smo vidjeli,

k = Boltzmann-ova konstanta = $1{,}38.10^{-23}$ Joul/°K
= — 228,6 dbW/°KHz
$T^{(o)}$ = temperatura u °K
b = širina pojasa u Hz

Uvrstimo li i ovdje kao jedinicu MHz, imamo

$$p_n = k\, T^{(o)} B \cdot 10^6$$

odnosno

$$p_n = 10 \log T^{(o)} B - 168{,}6 \text{ dbW} \tag{13.2.4}$$

Odnos između faktora šuma i temperature šuma (°K) dan je, kako smo vidjeli, (6.14) sa

$$T^{(o)} = 290\,(F - 1) \quad {}^0\text{K} \tag{13.2.5}$$

odnosno, ako je šum dan kao 10 log F db

$$T^{(o)} = 290 \left[\left(\text{antilog} \frac{\text{šum}}{10} \right) - 1 \right] \quad {}^0\text{K} \tag{13.2.6}$$

Često je vrlo koristan odnos ($P_c - T$) koji možemo dobiti iz (13.2.4) vodeći računa o tome da je $10 \log T^{(o)} = T$ (db). Iz (13.2.4) je naime

$$(P_c - P_n) = P_c - 10 \log T^{(o)} B + 168{,}6 \quad \text{db}$$

odnosno

$$(P_c - T) = (P_c - P_n) + 10 \log B - 168{,}6 \quad \text{dbW/}^0\text{K} \tag{13.2.7}$$

Odnos signal/šum za val nosilac, odnosno signal/šum u visokofrekventnom pojasu širine B (MHz) bio bi onda dan kao

$$(P_c - P_n) = P_T + G_T + G_R - L - T - 10 \log B - 168{,}6 \quad \text{db}$$

Primjeni li se za prenos frekventna modulacija, kao što se u većini prijedloga uzima, onda će za odnos signal/šum, definiran kao odnos vrh-vrh (pp) amplitude video signala prema efektivnom neponderiranom šumu vrijediti

$$(S - P_n) = (P_c - P_n) + F_f$$

gdje je F_f = poboljšanje, izraženo u db, koje donosi primjena frekventne modulacije, a koje slijedi iz (1), (3):

$$f_f = 3 \left(\frac{\Delta F}{f_m}\right)^2 \frac{B}{f_m}$$

ili

$$F_f = 20 \log \frac{\Delta F}{f_m} + 10 \log \frac{B}{f_m} + 4{,}77 \quad \text{db} \tag{13.2.9}$$

odnosno (2):

$$f'_f = 3 \left(\frac{\Delta F'}{f_m}\right)^2 \frac{B}{f_m} = 3 \left(\frac{0{,}7\,\Delta F}{f_m}\right)^2 \frac{B}{f_m}$$

$$F'_f = 20 \log \frac{\Delta F}{f_m} + 10 \log \frac{B}{f_m} + 1{,}67 \quad \text{db} \tag{13.2.10}$$

U gornjim je izrazima:

ΔF = pp devijacija nosioca za sastavljeni video signal (slika + sinhronizacija)
$\Delta F'$ = pp devijacija nosioca za signal slike (luminancija)
f_m = najviša modulaciona frekvencija u MHz
B = širina radiofrekventnog pojasa u MHz
F_f = poboljšanje u odnosu definiranom kao odnos pp video signala prema efektivnom neponderiranom šumu u (db)
F'_f = poboljšanje u odnosu definiranom kao odnos pp signala slike (luminancija) prema efektivnom neponderiranom šumu (db).

Širina radiofrekventnog pojasa određena je Carson-ovim pravilom kao

$$B = 2 \left[\frac{\Delta F}{2} + f_m\right] \tag{13.2.11}$$

Napomenimo odmah da je izraz (13.2.11) dosta diskutabilan, ako ga se želi univerzalno primjeniti. Uzme li se, naime, kao granica do koje želimo zadržati najviše komponente spektra, rezultata frekventne modulacije, amplituda

iznosa oko 3% amplitude nemoduliranog nosioca, onda će širina pojasa, u ovisnosti o indeksu modulacije, biti

za $\Delta F/2f_m = 0{,}2$ $\quad B = 2f_m$

za $\Delta F/2f_m = 2$ $\quad B = 2 \left|\frac{\Delta F}{2} + f_m\right|$

za $\Delta F/2f_m = 20$ $\quad B = 2 \left|\frac{\Delta F}{2} + f_m\right| \cong 2\,\Delta F$

Ako je, međutim, signal složen, kako je to često slučaj kad se istovremeno računa s prenosom drugih informacija, pa onda s devijacijom koju nameće primjena disperzije energije, može »klasično« Carson-ovo pravilo (13.2.11) dati preveliku širinu. Često je, osim toga, širina B dana drugim okolnostima kao ograničenje ili fiksna vrijednost, pa ni onda Carson-ovo pravilo nije primjenljivo. S ovim napomenama, i za naše račune ono će, međutim, biti primjenljivo.

Možemo, dakle, pisati

$$(S - P_n)' = (P_c - P_n) + 20 \log \frac{\Delta F}{f_m} + 10 \log \frac{B}{f_m} + 4{,}77 \quad \text{db} \tag{13.2.12}$$

$$(S - P_n) = (P_c - P_n) + 20 \log \frac{\Delta F}{f_m} + 10 \log \frac{B}{f_m} + 1{,}67 \quad \text{db} \tag{13.2.13}$$

I ovdje znači:

$(S - P_n)$ = pp amplituda video signal/efektivni neponderirani šum (db)

$(S - P_n)'$ = pp amplituda signala slike/efektivni neponderirani šum (db)

Šum je, kako je naglašeno, dan kao neponderirani šum s triangularnim spektrom (parabolička raspodjela snage). U mnogim slučajevima tražit ćemo odnos koji će se referirati na ponderirani šum. Konverzija, odnosno prelaz na ponderirani odnos, vrši se faktorima (faktor ponderacije) koji su opet ovisni o primijenjenom sistemu (f_c = najviša videofrekvencija).

Za sistem M (525 linija), koji je u upotrebi u USA i Kanadi (f_c = 4,0 MHz) korekcija je — 10,2 db

Za sistem G (625 linija) koji je u upotrebi u većini zemalja zapadne Evrope i kod nas (f_c = 5,0 MHz), korekcija je — 16,3 db

Neke od odnosa koji su u primjeni prilikom proračuna uvjeta opskrbe programom putem satelita, korisno je imati dane i grafički. Iz (6.5.2) imamo tako na slici 7.3.5 (u poglavlju 7.3) odnos između G, D i f za diskretne vrijednosti za f, u gornjem dijelu, a u donjem odnos između G, $2\delta^{(o)}$ i površine u km², koju može pokriti antena danog dobitka na geostacionarnom satelitu, ako se satelit nalazi u zenitu središta kruga kome odgovara ta površina, s jedne strane, a između snage odašiljača na satelitu EIRP i gustoće toka (dbW/m²) odnosno jakosti polja (dbμV/m) s druge. Ako je naime isijana snaga EIRP dana u dbW, gustoća toka na mjestu prijema u dbW/m² onda će jakost polja na mjestu prijema slijediti iz odnosa koje smo vidjeli ranije

$$S = \frac{p}{4\pi d^2} \qquad W/m^2$$

gdje je S gustoća toka uz p u W i d u m (u našem slučaju visina geostacionarnog satelita)

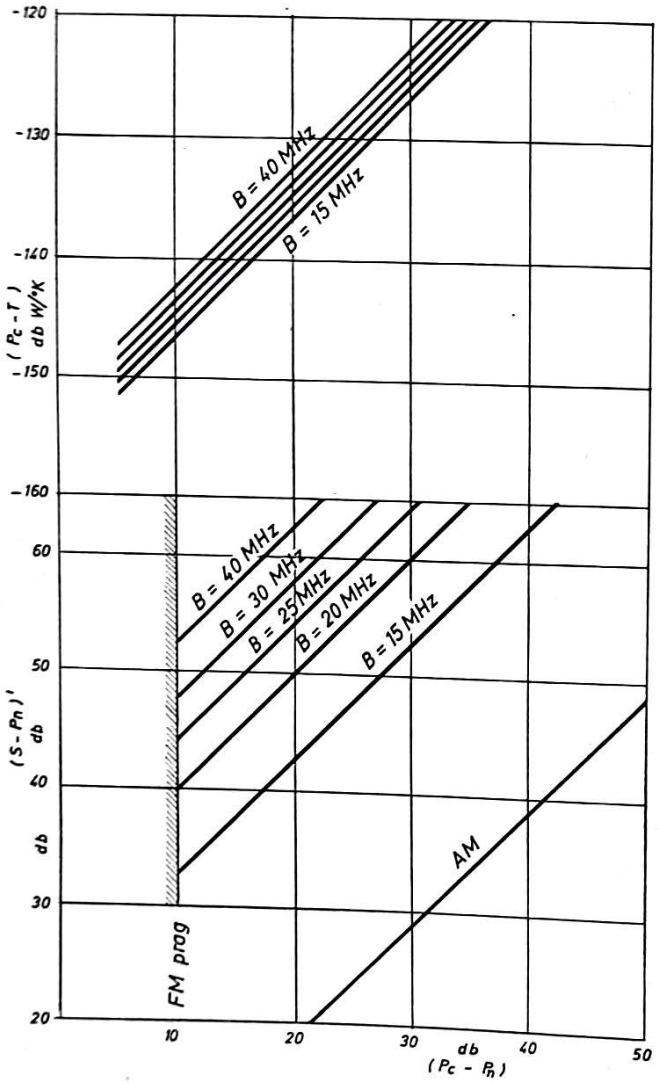
$$E = 19{,}4 \sqrt{S \cdot 10^6} \qquad \mu V/m \qquad (13.2.14)$$

odnosno

$$10 \log S = 10 \log p - 162$$

$$20 \log E = 145{,}76 + 10 \log S = 145{,}76 + 10 \log p - 162$$

$$20 \log E = 10 \log p - 16{,}24 \qquad (13.2.14a)$$



Slika 13.2.1

Na slici 13.2.1 dan je u gornjem dijelu odnos (u db) /$P_c - P_n$) u ovisnosti ($P_c - T$) (dbW/°K) za diskretne vrijednosti širine pojasa B, dakle odnos snage nosioc/šum prema odnosu nosioc/temperatura. Snaga šuma dana je u (13.2.4)

$$P_n = 10 \log T^{(o)} + 10 \log B - 168{,}6 \text{ dbW}$$

za razne B, kao parametar, možemo naći vrijednosti

$$P_n - 10 \log T^{(o)} = 10 \log B - 168{,}6$$

Uzmemo li razne vrijednosti x za ($P_c - P_n$), možemo postaviti

$$P_n - 10 \log T^{(o)} = P_c - x - 10 \log T^{(o)}$$

ili

$$(P_c - T) = 10 \log B - 168{,}6 + x$$

Za razne ($P_c - P_n$) na osi apscisa imamo, za razne uobičajene B, kao parametre, na osi ordinata pripadajuće vrijednosti ($P_c - T$).

U donjem dijelu dan je odnos $(S - P_n)'$ s ponderacijom — 16,3 db kao funkcija ($P_c - P_n$) za isti B kao i u gornjem dijelu slike 13.2.1, uz frekventnu modulaciju. Kao granica za ($P_c - P_n$) uzeta je donja vrijednost za prag (10 db) kod FM prijema.

Ako se radi o amplitudnoj modulaciji s djelomično potisnutim bočnim pojasom, ako dakle imamo situaciju kakvu imamo kod normalne »zemaljske« distribucije, putem odašiljača na Zemlji, televizijskog programa, situacija je dosta složenija a i određivanje odnosa manje je jednoznačno neko kad se radi o frekventnoj modulaciji. U literaturi nalaze se različiti podaci koji su, dakako, ovisni i o sistemu. Odnosi variraju između

$$(S - P_n) = (P_c - P_n) + 1{,}5 \qquad \text{db} \qquad (13.2.15)$$

i

$$(S - P_n) = (P_c - P_n) - 1{,}5 \qquad \text{db} \qquad (13.2.16)$$

U ovim granicama su i vrijednosti na slici 13.2.1 s oznakom AM.

Na slici 13.2.2 vidimo konačno odnose snaga vala nosioca na prijemniku prema isijanoj snazi satelita, odnosno jakosti polja, odnosno gustoći snage na mjestu prijema za razne promjere antena. Iz poznatih odnosa, koje smo vidjeli gore, imamo dalje.

$$P_c = 10 \log S + A \qquad \text{dbW}$$

gdje je A fektivna površina prijemne antene izražena u db prema površini 1 m². Evidentno je da je

$$A = 10 \operatorname{lcg} \frac{D^2\pi}{4} \eta$$

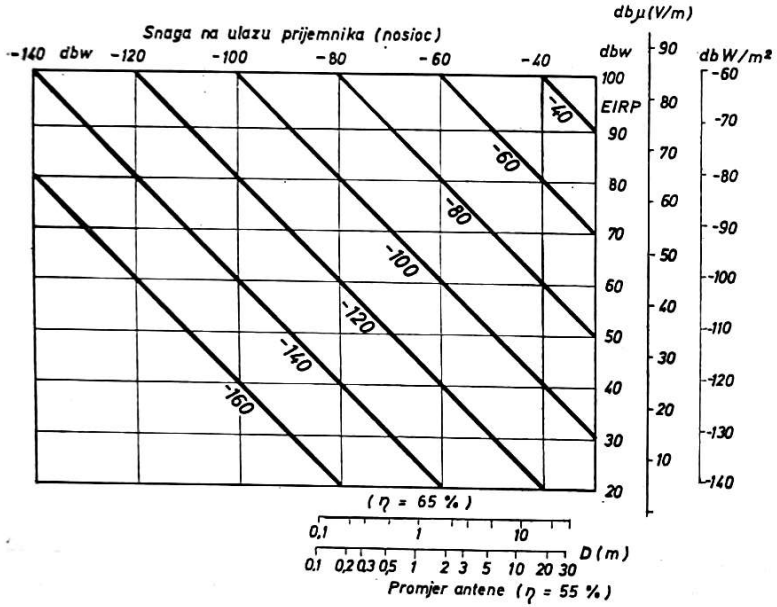
Budući da je

$$10 \log S = 10 \log p - 162 \quad \text{dbW/m}^2$$

možemo konačno postaviti

$$P_c = 10 \log p - 162 + A \quad \text{dbW}$$

Na ovoj bazi napravljen je diagram uz $\eta = 0{,}55$ i $\eta = 0{,}65$.



Slika 13.2.2

U bogatoj literaturi objavljenoj u ovom desetljeću, dan je čitav niz proračuna satelitskih veza koji se, ponekad, međusobno jako razlikuju, ne samo zbog toga što su se u tom periodu gomilala nova saznanja, mijenjali zahtjevi i korigirale metode računanja. Najbrojniji su, dakako, proračuni koji se odnose na radiodifuzne (radiodifuzne u užem smislu i televizijske) satelite. Čitav niz rezultata objavljen je u dokumentima CCIR-a, navedenim u literaturi uz ovo poglavlje.

Da vidimo koliko su i na koji način pojedine osnovne postavke primjenljive kod ovih proračuna, pogledat ćemo, prije radiodifuznih satelita, par primjera koji se odnose na druge vrste.

U (3) dan je proračun jednog ISIS satelita koji treba da šalje ionograme s podacima o ionosferi, gledanoj s vanjske strane, u obliku slike. Evo toga proračuna:

Visina satelita	3 500 km
Udaljenost do ruba pokrivanja uz elevaciju 5°	6 900 km[1]
Frekvencija emitiranja satelita	401,750 MHz
1. snaga odašiljača	6 dbW
2. dobitak antene odašiljača	— 7 db
3. gubitak u kabelu i slično	— 3 db
4. gubici propagacije	— 161 db[2]
5. dobitak prijemne antene	+ 35 db
6. gubici u kablovima i sl.	— 1 db
7. signal na ulazu u prijemnik [Σ (1 — 7)]	— 131 dbW
8. kT°b (za 1 Hz i 290° K)	— 204 dbW
9. šum prijemnika	+ 3 db
10. širina pojasa 500 kHz	+ 57 db
11. snaga šuma na ulazu u prijemnik [Σ (8 — 10)]	— 144 dbW
12. prag prijemnika	10 db
13. potrebna snaga na ulazu (11 + 12)	— 134 dbW
14. rezerva signala	3 db
15. $(P_c - P_n) = (13 + 14 - 11)$	+ 13 db
$\Delta F = 0{,}1$ MHz	
$B = 0{,}5$ MHz	
$f_m = 0{,}04$ MHz	
$f_f = 3 \left(\frac{\Delta F}{f_m}\right)^2 \frac{B}{f_m} = 234$; F_f	+ 23,7 db
16. $(S - P_n) = (P_c - P_n) + F_f$	36,7 db

U (1) dan je vrlo interesantan primjer proračuna za satelit Telstar I i zemaljsku stanicu Andover. Radi se o prenosu monokromatskog televizijskog signala, u sistemu 525 linija, s $f_m = 4$ MHz, a tražilo se je da odnos signal/ponderirani šum bude 46 db. Kako je za triangularni šum i sistem 525 linija (USA, Kanada) karakteristika ponderacije 10,2 db, imamo za ono što smo ranije označili kao $(S - P_n)'$ vrijednost $46 - 10{,}2 = 35{,}8$ db.

Ako se kao radni odnos usvoji $(P_c - P_n) = 15$ db, dakle 5 db iznad praga za FM prenos, možemo iz (13.2.13) postaviti*

$$(S - P_n)' = 35{,}8 - 15 + 20 \log \frac{\Delta F}{4} + 10 \log \frac{B}{4} + 1{,}68 \text{ db}$$

kako smo rekli vrijedi

$$B = 2 \left[\frac{\Delta F}{2} + 4\right]$$

no mi ne znamo ni B ni ΔF. U (1) dana je metoda, za praksu dovoljno točna, za određivanje odnosa B/f_m. Ako je

[1] $P_n = 10 \log T + 10 \log B - 168{,}6 = 28{,}75 + 12{,}55 - 168{,}6 = -127{,}3$ dbW

[2] $g_1 = 4\pi/\lambda^2$. $10 \log g_1 = G_1 = 43{,}02$ db

* U (1) dan je član koji u (13.2.13) ima iznos 1,67 s vrijednošću 1,68 koja ovdje nije korigirana.

$$x = \frac{B}{f_m}$$

$$y = (S - P_n)' - (P_c - P_n) - 1{,}68$$

onda je

$$x - 2 = \sqrt{\frac{10^{\frac{y}{10}}}{y}} = \sqrt{\frac{\text{anti log}\,(y/10)}{x}}$$

U našem je slučaju

$$x - 2 = \sqrt{\frac{10^{\frac{19{,}12}{10}}}{x}} = \sqrt{\frac{81{,}3}{x}}$$

jer je $(S - P_n)' - (P_c - P_n) - 1{,}68 = 35{,}8 - 15 - 1{,}68 = 19{,}12$ db
pa je onda

$x = 5{,}75$

$B = 5{,}75 \cdot 4 = 23$ MHz

$\Delta F = 15$ MHz

Iz (13.2.7) je

$$(P_c - T) = 15 + 10 \log 23 - 168{,}6 = -139{,}9 \text{ dbW/}^0\text{K}$$

Izmjerena temperatura prijemnog sistema je 50^0 K pa je prema tome snaga potrebna na ulazu

$$P_c = -139{,}9 + 10 \log 50 = -122{,}9 \text{ dbW}$$

Radna je frekvencija 4170 MHz a udaljenost do ruba područja oko 9250 km. Prijemna antena ima površinu od 335 m² (D = 20,6 m) a stupanj djelovanja aperture je 80%. Iz (6.5.2) je

$$G = 26{,}2 + 72{,}4 - 41{,}48 = 57{,}12 \text{ db}$$

Izraz iz (6.5.2) daje dobitak za stupanj djelovanja aperture 65%. Za 80% je stvarni dobitak za 10 log (80/65) = 1,09 veći, pa je

$$G = 57{,}12 + 1{,}09 = 58{,}21 \text{ db}$$

Gubitak propagacije u slobodnom prostoru je

$$L = 20 \log d + 20 \log f + 32{,}46 \text{ db}$$

$L = 184{,}14$ db

Kako je, dalje (13.2.1)

$$P_T + G_T = -122{,}9 + 184{,}14 - 58{,}21 = 3{,}03 \text{ dbW}$$

a dobitak emisione antene na satelitu 0 db, izlazi, konačno, snaga odašiljača na satelitu

$P_T = 3{,}03$ dbW $(p_T = 2$ W)

Kao što smo rekli, za radiodifuzne odnosno televizijske satelite, objavljen je u dokumentima CCIR-a niz primjera. Dokumente o kojima je riječ, dajemo na koncu ovog poglavlja pod brojevima (4) do (17).

Jedan od prvih, ako ne prvi, je (4). U njemu je, kako se ističe, zamišljena upotreba pasivnog satelita da se dođe do reda veličina, u prvom redu dimenzija satelita i snage odašiljača na Zemlji, kad je u pitanju pokrivanje Francuske.

Kako je (13.2.14)

$$E = 19{,}4 \sqrt{S} \quad \text{V/m}$$

ako je S = gustoća u W/m² ili

$$S = \frac{E^2}{377} \quad \text{W/m}^2$$

gdje je 377, kako je poznato, karakteristična impedancija slobodnog prostora (120 π) za ravni val. U dokumentu se govori o jakosti polja od 1 mV/m, što znači da je potrebna gustoća toka

$$S = \frac{(10^{-3})^2}{377} = 2{,}65 \cdot 10^{-9} \text{ W/m}^2$$

Dokument računa, zbog jednostavnosti s $3 \cdot 10^{-9}$ W/m². Da bi se pokrila površina od $O = 10^6$ km² (kvadrat sa stranicama 1000 km, što po prilici odgovara Francuskoj) potrebno je da se na tu površinu isija

$$p = S \cdot O = 3 \cdot 10^{-9} \cdot 10^{12} = 3 \cdot 10^3 \text{ W}$$

Uz zaokruženu udaljenost pasivnog satelita od 36 000 km, vidjet će se gornja površina pod kutem

$$\alpha = \frac{1000}{36000} = 0{,}0278 \cong 0{,}03 \text{ rad}$$

$$\alpha^{(o)} = 1{,}593^0 \cong 2^0$$

Uzmimo da je promjer satelita 100 m i da je izveden tako da reflektira u smjeru iz kojeg dobiva energiju. Kut pod kojim će se satelit vidjeti sa Zemlje je

$$\beta = \frac{0{,}1}{36000} = 2{,}78 \cdot 10^{-6} \cong 3 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$$

$$\beta^{(o)} = 0{,}620''$$

(u dokumentu zaokruženo na $\beta = 0{,}64''$)

Evidentno je da je nemoguće osigurati sa Zemlje snop s ovakvom aperturom, a kad bi i bilo, trebalo bi snop uzeti širi da se izbjegne gubljenje satelita iz snopa. Kad bi uzeli, što je također vrlo maleno, da je apertura snopa $\beta = 1'$, onda bi odnos snage koju stvarno trebamo dati i one koju bi trebali teoretski, bio dan kao kvadrat odnosa apertura

$$\left(\frac{60}{0{,}64}\right)^2 = 8800 \cong 10^4$$

Budući da su u primjeru zanemareni gubici refleksije, bila bi snaga koju je potrebno poslati sa Zemlje prema satelitu

$$p \cdot 10^4 = 3 \cdot 10^8 \cdot 10^4 \text{ W} = 30 \text{ MW}$$

U dokumentu je umjesto uobičajenog izraza (6.1) upotrijebljen izraz

$$2\delta_0 = \frac{140\,\lambda}{D}$$

gdje je $2\,\delta_0$ kut između prvih nula snopa u[0]. Kako je gore

$$2\,\delta_0 = \left(\frac{1}{60}\right)^0$$

imamo

$$D = 8400\,\lambda$$

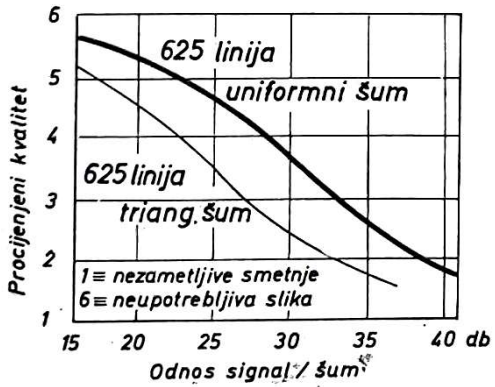
pa je

za $\lambda =$ 1 cm	$D =$ 84 m
za $\lambda =$ 10 cm	$D =$ 840 m

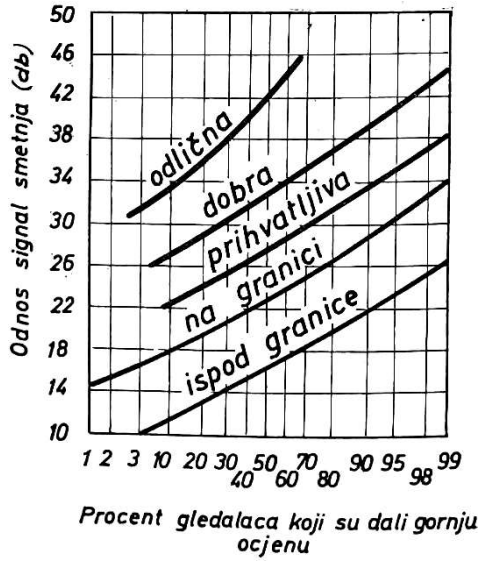
što znači da bi promjer antene za frekvenciju od cca 1000 MHz ($\lambda = 30$ cm) morao biti $D = 2640$ m. Ukoliko bi išli na frekvencije iz područja 2000 MHz bio bi promjer $D = 1280$ m dok bi kod 12 GHz promjer bio »svega« 210 m. Potrebna isijana snaga je, međutim, u svakom slučaju 30 MW. Jedan primjer s pasivnim satelitom karakteristika izotropnog radiatora dan je i u (19).

Ideja pasivnog satelita zaokuplja uostalom Francuze i dalje. Jedan noviji dokument (18) i dalje tretira mogućnosti ove vrste, ali sada sa satelitom promjera 300—400 m i s karakteristikama refleksije takvim da se refleksija vrši samo u smjeru iz kojeg dolazi energija. Promjer antene je cca 500 m a isijana snaga 10 MW. Satelit bi zbog refleksionih svojstava, kakva bi trebao imati, mogao poslužiti s istim efektom nizu zemalja.

Slika 13.2.4 ▶



Slika 13.2.3



Za aktivne satelite dan je niz primjera u najnovijem dokumentu finalnog zasjedanja komisije CCIR IV u Ženevi (17). Uzet ćemo neke koji nam izgledaju karakteristični:

Uzmimo kao prvi slučaj koji se u USA vrlo često razmatra: direktna emisija sa satelita u području televizijskog pojasa V (800 MHz) s uobičajenom amplitudnom modulacijom i potisnutim jednim bočnim pojasom, kako to odgovara sistemu M. Kao zadovoljavajući uzet je odnos signala luminancije prema ponderiranom šumu s vrijednošću 29 db. Tome odgovara, kako smo vidjeli, vrijednost odnosa nosioc/šum — prije demodulacije — od 30,5 db. Kako su ispitivanja vršena u USA, kojih rezultate vidimo na slikama 13.2.3 i 13.2.4, pokazala, daje slika s tim odnosom još uvijek primjetljiv šum koji ne smeta, a za oko 30% ispitanih gledalaca, kvalitet je označen sa »fini«. Ako pretpostavimo da antena (ukrštena Yagi ili helikoidalna) ima pojačalo u neposrednoj blizini, možemo računati da je faktor šuma pojačala 4 (= 6 db). U tom slučaju račun bi izgledao:

Frekvencija nosioca	800 MHz
Tip modulacije	AM
Širina modulacionog pojasa	4,2 MHz
Odnos nosioc/šum	30,5 db
Snaga šuma u radiopojasu (FkTB)	— 131,7 dbW
Dobitak prijemne antene	17 db
Razni gubici	— 1 db
Za odnos 30,5 db potrebna snaga nosioca na ulazu	— 101,2 dbW
Efektivna površina antene prema 1 m²	— 2,51 db
Potrebna gustoća energije [— 101,2 — (— 2,51)]	— 98,69 dbW
Odgovarajuća jakost polja	47,06 db (μV/m)
Odgovarajuća jakost polja	225 μV/m
Gušenje u slobodnom prostoru (39.000 km)	182,7 db
Dodatno atmosfersko gušenje	1 db
Potrebna isijana snaga (EIRP) satelita	66,5 dbW
Apertura antene satelita na 3 db	1,4°
Dobitak antene na rubu zone pokrivanja	38,28 db
Približni promjer antene uz $\eta = 0{,}65$	17 m
Gubici u valovodu, filtru i sl.	1 db
Potrebna snaga odašiljača	29,22 dbW
	— 0,835 kW

Vrijednosti koje su dane gore ne odgovaraju u cijelosti onima u dokumentu prema kojem je proračun rađen, ali daju točan tok proračuna i red veličine.

Uzmemo li da je uz sliku potrebno slati i ton i da je odnos slika : ton = = 1 : 10 te da je stupanj djelovanja reda 25%, vidimo da bi potrebna primarna snaga bila reda 4 kW.

U Kanadi se svestrano proučava distribucija programa putem satelita. Primjer proračuna jednog sistema dan je u (21) za radnu frekvenciju 12 GHz. U računu koji je niže dan postoje stanovita odstupanja u vrijednostima prema računu u originalnom dokumentu koja su posljedica malih razlika u računanju. Vrijednosti koje slijede baziraju se na izrazima izvedenim ranije.

RF pojas	18 MHz
Indeks modulacije ($\Delta F/f_m$)	1,15
($P_c - P_n$) na rubu područja	17 db

Zemaljska stanica

Temperatura šuma sistema	750° K
Snaga šuma u RF pojasu	— 127,3 dbW[1]
Potrebna snaga nosioca	— 110,3 dbW
Promjer antene	1,6 m
Dobitak efektivne površine 1 m²	43,02 db[2]
Dobitak antene uz $\eta = 0,6$	43,85 db[3]
Dobitak antene prema 1 m²	0,83 db
G — T antene (T = 750° K)	15,09 bdb/°K
Gubitak neprilagođenja antene	— 1 db
Potrebna snaga na rubu područja	— 110,13 dbW/m²[4]

Satelitska stanica

Širina snopa antene (3 db)	1°
Promjer antene	1,74 m
Dobitak antene ($\eta = 0,55$) na rubu područja	41,18 db
Gubitak propagacije u slobodnom prostoru (38.000 km)	205,6 db
Potrebni EIRP satelita	52,45 dbW[5]
Gubici u vodu, filterima itd.	1 db
Tražena snaga odašiljača P_T	12,37 dbW
Tražena snaga odašiljača p_T	17,8 W

U (11) dano je također nekoliko primjera proračuna za direktnu radiodifuziju i televiziju sa satelita. Uzmimo primjer televizije uz amplitudnu modulaciju i radnu frekvenciju 800 MHz (u zagradama dane su vrijednosti iz originalnog dokumenta):

Šum u pojasu 5 MHz uz faktor šuma prijemnika 4 (= 6 db)	— 131,79 dbW	(— 132)
Odnos ($P_c - P_n$) u pojasu 5 MHz	50 db	
Snaga nosioca na antenu	— 81,79 dbW	(— 82)
Dobitak antene prema poluvalnom dipolu	15 db	
Dobitak antene prema izotropnom radiatoru (G_d = 2,164 db)	17,164 db	

(1) $P_n = 10 \log T + 10 \log B - 168,6 = 28,75 + 12,55 - 168,6 = -127,3$ db

(2) $g_1 = 4\pi/\lambda^2$, $10 \log g = G = 43,85$ db

(3) $g = 0,6\,(D^2\pi/4)\,g_1$, $10 \log g = G = 43,85$ db

(4) Tok snage na rubu bit će dan kao potrebna snaga (db) umanjena za dobitak antene prem 1 m² (db) umanjenom za gubitke (db), dakle $110,3 - (-0,83 + 1) = 110,13$ dbW/m²

(5) Iz $P_c = (P_T + G_T) + G_R - L$ na G_R umanjen za gubitke $(P_T + G_T) = -110,3 - 42,85 + 205,6 = 52,45$ dbW

Dobitak efektivne površine 1 m²	19,49 db	
Dobitak antene prema 1 m²	— 2,33 db	(— 2)
Potrebni tok na mjestu prijema	— 79,44 dbW/m²	(— 80)
Odgovarajuća jakost polja	66,32 db (μV/m) (2,07 mV/m)	(66)
Potrebna isijana snaga satelita	83,61 dbW	(83)
Potrebna snaga odašiljača uz širinu snopa 1° (za rub područja d = 40.000 km)*	42,31 dbW[1] (17,4 kW)	(41) (13)
Dobitak antene (1°)	44,3 db[2]	(45)
Potrebna snaga odašiljača uz širinu snopa 2,5° (za rub područja d = 40.000 km)*	50,27 dbW (106,5 kW)	(49) (80)
Dobitak antene (2,5°)	36,3 db	(37)
Promjer antene (1°) uz $\eta = 0,55$	26,43 m	(30)
Promjer antene (2,5°) uz $\eta = 0,55$	10,56 m	(12)

U (23) dao je Suzuki bilansu prenosa Zemlja-satelit i satelit-Zemlja za SYNCOM 3 koji je, kako je poznato, posredovao u prenosu programa Olimpijskih igara iz Tokija 1964.

Za vezu Zemlja-satelit odnosi su bili:

0. Frekvencija	7359,423 MHz
1. Snaga odašiljača (10 kW)	40 dbW
2. Dobitak antene (10 m, $\eta = 50\%$)	54,3 db
3. Gubitak u valovodu	— 1,0 db
4. Gubici propagacije	— 202,0 db
5. Atmosferska apsorpcija	— 0,6 db
6. Dobitak prij. antene satelita	0,0 db
7. Primljena snaga (P_c) Σ (1 — 6)	— 109,3 dbW
8. Temperatura šuma satelita (T = 2900° K)	34,6 db
9. (P_c — T) = (7 — 8)	— 143,9 dbW/°K
10. Boltzmanova konstanta	— 228,6 dbW/°K/Hz
11. Širina pojasa (10 MHz)	70,0 db
12. ($P_c - P_n$) [9 — (10 + 11)]	14,7 db

Za vezu Satelit-Zemlja odnosi su bili

1. Prosječna temperatura šuma	40° K
2. EIRP satelita	6,5 dbW
3. Gubici propagacije	— 189,8 db
4. Gubitak direktivnosti antene	— 0,3 db

(1) Gušenje za 40.000 km je 182,56 db; 182,56 — 81,79 = 100,77; 100,77 — 17,164 = = 83,606 dbW.

(2) $G = 44,3 - 20 \log 2\delta$; dobitak u smjeru ruba područja je očito G — 3 db.

* d = 40 000 km dano je u originalu.

5. Dobitak prijemne antene	51,2 db
6. Primljena snaga (P_c)	— 132,4 dbW
7. (P_c — T)	— 148,4 dbW/°K
8. Ukupni gubici	— 1,0 db
9. Efektivni (P_c — T)	— 149,9 dbW/°K
10. Boltzmanova konstanta	— 228,6 dbW/°K/Hz
11. Širina pojasa (10 MHz)	70 db
12. (P_c — P_n)	8,7 db

U tablici I sakupljene su karakteristične vrijednosti odnosno rezultati računa parametara iz primjera navedenih u (17), i to više sa svrhom da ilustriraju odnose u snagama, nego da demonstriraju način računanja. Rezultati dani u spomenutom dokumentu nisu, naime, svi posljedica primjene iste metode računanja, jer su i autori računa iz različitih zemalja. Neovisno o tome, mi možemo vidjeti, da se, za razne postavljene ciljeve, snage odašiljača na satelitu, koje dolaze u pitanje za realizaciju tih ciljeva, kreću od 9 dbW, dakle 8 W, pa do 64 dbW, dakle preko 2,5 MW. Evidentno je da je čitav niz postavljenih zadataka posve teoretske naravi za priličan niz godina, a možda čak i trajno, no iz gornje tabele i izvedenih računa evidentno je također da je realizacija niza postavljenih zadataka moguća već danas. Ako do realizacije nije još došlo nisu uzroci tehničke nego gotovo isključivo političke naravi. U prilog ovoj tvrdnji govori niz podataka danih u dokumentu (22) koji je inače smatran vrlo pesimističnim. Te podatke vidimo u tablicama koje slijede.

TABLICA I

Red. br.	Frekvencija	Širina snopa	Jakost polja	EIRP satelita	Snaga odašiljača satelita	Modulacija	
1.	800	1,4	63	81	44	AM	Televizija individualni prijem
2.	800	1,4	47	65	28	AM	
3.	800	1,4	37	55	18	FM	
4.	2500	1,4	35	53	16	FM	
5.	12000	1,4	65	86	49	AM	
6.	12000	1,4	43	64	27	FM	
7.	800	4	28	47	19	FM	Televizija skupni prijem
8.	2500	4	28	47	19	FM	
9.	12000	1	38	59	19	FM	
10.	100	10	58	86	64	FM	Radiodifuzija stereo
11.	800	1,4	74	92	55	FM	
12.	2000	1,4	70	88	51	FM	
13.	12000	1,4	63	84	47	FM	
14.	25	20	45	65	53	AM	Radiodifuzija
15.	25	20	47	27	35	AM	
16.	100	10	20	38	16	FM	
17.	800	1,4	34	52	15	FM	
18.	2000	1,4	32	50	13	FM	
19.	12000	1,4	25	46	9	FM	
	MHz	(°)	db (μV/m)	dbW	dbW		

TABLICA IIa

zona pokrivanja promjera 1000 km (otvor antene satelitskog odašiljača 1,4°)

Frekvencija i način modulacije	800 MHz AM	800 MHz FM	12000 MHz FM	12000 MHz FM
Snaga odašiljača dbW	28	36	22	41
Primarna snaga kW	1,26	8	0,3	26
Težina satelita u orbiti kg	350—450	1050—1200	250—300	3200
Predviđena godina raspoloživosti	1977—1978	1978—1980	1977	1982—1985
Cijena lansiranja u mil. US $	8—12	20—25	8—10	30

27	1,0	300—400	1975	8—12

TABLICA IIb

zona pokrivanja promjera 2000 km (otvor antene satelitskog odašiljača 2,5°)

Frekvencija i način modulacije	800 MHz AM	800 MHz FM	12000 MHz FM	12000 MHz FM
Snaga odašiljača dkW	33	41	27	46
Primarna snaga kW	4	26	1	80
Težina satelita u orbiti kg	650—750	3200	380—400	?
Predviđena godina raspoloživosti	1975—1976	1982—1985	1975	?
Cijena lansiranja u mil. US $	12—16	30	8—12	?

32	3	500—600	1977—1979	12—16

TABLICA IIc

zona pokrivanja promjera 3200 km (otvor antene satelitskog odašiljača 5°)

Frekvencija i način modulacije	800 MHz AM	800 MHz FM	12000 MHz FM	12000 MHz FM
Snaga odašiljača dbW	39	47	33	52
Primarna snaga kW	16	104	4	320
Težina satelita u orbiti kg	1900—2100	?	650—750	?
Predviđena godina raspoloživosti	1978—1980	?	1975—1976	?
Cijena lansiranja u mil. US $	20—30	?	12—16	?

38	12,4	1500—1700	1980—1985	20—30

Što se tiče nabrojenih mogućnosti onako kako su navedene u tablici I, potrebno je možda napomenuti slijedeće:

Televizija u pojasu 800 MHz uz amplitudnu modulaciju predstavlja rješenje koje zahtijeva najmanje intervencije na postojećim prijemnicima, ukoliko su one uopće potrebne (samo kod prijemnika koji nemaju područje IV/V pojas). Iz tablice IIa vidimo da je za »manja« područja (800 000 km²) realizacija moguća ili gotovo moguća s danas raspoloživim sredstvima.

Uz frekventnu modulaciju u istom području potreban je konverter AF-FM i možda nešto bolja antena. Konverter predstavlja u svakom slučaju izdatak, no cijena satelita je očito (vidi tablicu IIa, b i c) znatno niža i s realizacijom bližom današnjim mogućnostima.

TABLICA III

Osnovne karakteristike prijemnog dijela

	860 MHz gradsko područje	12000 MHz gradsko područje	860 MHz seosko područje	12000 MHz seosko područje	860 MHz zajednički prijem	12000 MHz zajednički prijem
Šum prijemnika (db)	16 i 10	*	*	*	*	*
Tip antene	Yagi ili log. periodska	parabola 1 m ϕ	Yagi, dobra log. periodska ili 1,5 ϕ parabola	parabola 1 m ϕ	parabola 3 m ϕ	parabola 1 m ϕ
Dobitak antene (db)	12	39	20	39	25	39
Šum predpojačala (db)	**	6	6	6	4	4
Gubici u vodu (db)	2	0	0	0	0	0
Predpojačalo i konverter	ne	da	da	da	da	da

* Zbog primjene predpojačala šum prijemnika ima malen efekt na parametre sistema.

** U gradskom području nije potrebno predpojačalo.

Tablica je uzeta iz (22)

U području 12 000 MHz, uz amplitudnu modulaciju, bit će uz prijemnik potrebni konverteri za prebacivanje pojasa 12000 MHz u jedno od nižih područja koje normalni prijemnici imaju. Uz to bit će potrebna i nova antena — parabolični reflektor.

U istom području uz frekventnu modulaciju bit će potreban konverter s dvije funkcije: on će morat izvršiti i konverziju FM-AM. Uz to dolazi u pitanje i nova antena. Snaga je i ovdje kako se iz tablica IIa b c vidi, znatno niža nego kod amplitudne modulacije u ovom području.

Ovo je rezoniranje očito jednostrano, jer su zanemareni problemi frekvencija kao takvi. Za njih vrijedi ono što je ranije rečeno (Poglavlje 4).

LITERATURA

(1) *Schelley:* Wideband F. M. Systems for Television — The calculation of Signal-to-noise ratio. UER Doc Com T (N) 6/2.

(2) UER Doc Com T (N) 13 str. 3, 27. III 1967.

(3) *Franklin et al.:* System for mass producing topside ionograms, PIRE, juni 1969, str. 934.

(4) CCIR Doc IV/21: Feasibility of direct broacasting from Earth Satellites, 12. VI 1962.

(5) CCIR Doc IV/73: Technical factors affecting the Feasibility of direct broadcasting from Earth Satellites, 13. VI 1962.

(6) CCIR Doc 242: Active Earth Satellites for broadcasting.

(7) CCIR Doc IV/5: Feasibility of direct broadcasting from Artificial Earth Satellites, 24. VIII 1964.

(8) CCIR Doc IV/82: Technical feasibility of direct broadcasting from Earth Satellites, 3. II 1965.

(9) CCIR Doc IV/83: Possibilités techniques de faire des émissions de radiodiffusion directes à partir de satellites artificiels, 3. II 1965.

(10) CCIR Doc IV/205: Possibilité de faire des émissions de radiodiffusion directes à partir de satellites, 21. II 1966.

(11) CCIR Doc IV/27: Feasibility of direct sound and television broadcasting from Satellites, 20. V 1968.

(12) CCIR Doc X/52: Service de radiodiffusion directe par satellites, 5. III 1968.

(13) CCIR Doc IV/217: Direct broadcasting service from Satellites, 6. V 1969.

(14) CCIR Doc IV/310: Possibilité de faire des émissions de radiodiffusion sonore et de television directes à partir de satellites, 30. V 1969.

(15) CCIR Doc IV/311: Possibilité de faire des émissions de radiodiffusion sonore ou visuelle directe à partir de satellites, 2. VI 1969.

(16) CCIR Doc IV/312: Possibilité de faire des émissions de radiodiffusion sonore ou visuelle directe à partir de satellites, 2. VI 1969.

(17) CCIR Doc IV/458: Possibilité de faire des émissions directes de radiodiffusion sonore et de television à partir de satellites, 2. X 1969.

(18) ORTF, Service des etudes: Les satellites de communication (interni dokument) vjerojatno 1966.

(19) *Galić:* Televizija sa satelita, Elektrotehnika 1966, br. 2, str. 102 do 109.

(20) CCIR Doc X/132: — 26. III 1969.

(21) CCIR Doc IV/232: Use of frequency bands above 10 GHz for communication-satellite system, 14. V 1969.

(22) UN Doc A/AC 105/51 od 26. II 1969, Annex 3 — str. 7, 8 i 9.

(23) *K. Suzuki:* Advanced TV techical problems in Japan, NHK techn. laboratories, 8. apr. 1965.

14.

Dodatak

KARAKTERISTIKE ZONA POKRIVANJA USKIM SNOPOM

U tablici I dane su vrijednosti odnosa velika os : mala os i kut inklinacije ω_1 velike osi prema meridijanu koje karakteriziraju površinu što je pokriva satelit s uskim snopom u geostacionarnoj orbiti, kad se »središte« zone pokrivanja nalazi u točkama kojima satelit nije u zenitu (1). Pri tome je

Δ = razlika u geografskoj duljini između »središta« zone pokrivanja i mjesta kome je satelit u zenitu

B = geografska širina iste točke

TABLICA I

Odnosi velika os: mala os

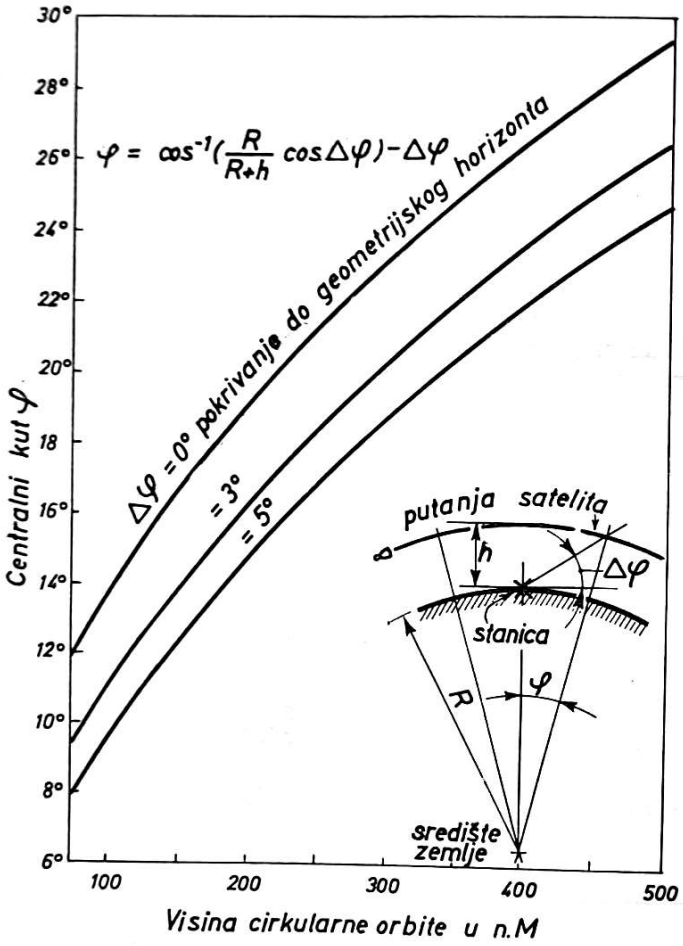
Δ \ B	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
0°	1	1.021	1.090	1.220	1.446	1.850	2.673	5.009	42.68
10°	1.021	1.043	1.113	1.246	1.477	1.891	2.736	5.153	48.21
20°	1.090	1.113	1.188	1.330	1.577	2.022	2.940	5.633	78.25
30°	1.220	1.246	1.330	1.489	1.769	2.277	3.344	6.634	—
40°	1.446	1.477	1.577	1.769	2.108	2.736	4.098	8.718	—
50°	1.850	1.891	2.022	2.277	2.736	3.609	5.633	14.12	—
60°	2.673	2.736	2.940	3.344	4.098	5.633	9.789	48.21	—
70°	5.009	5.153	5.633	6.634	8.718	14.12	48.21	—	—
80°	42.68	48.21	78.25	—	—	—	—	—	—

Inklinacija ω_1 velike osi

Δ \ B	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
0°	—	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
10°	90°	45°27′	27°16½′	19°25½′	15°20′	12°58′	11°30½′	10°38′	10°9′
20°	90°	64°30′	46°47′	36°3′	29°31′	25°25′	22°48′	21°10′	20°17′
30°	90°	73°16′	59°22′	49°6′	41°56′	37°0′	33°41½′	31°34′	—
40°	90°	78°18½′	67°49′	59°13′	52°33′	47°36′	44°6′	41°46′	—
50°	90°	81°42½′	73°59′	67°14½′	61°39½′	57°16′	54°0′	51°45′	—
60°	90°	84°16′	78°50′	73°54′	69°38½′	66°9′	63°26′	61°31′	—
70°	90°	86°22½′	82°54′	79°41′	76°50′	74°25′	72°30′	—	—
80°	90°	88°14′	86°33′	—	—	—	—	—	—

ZONE VIDLJIVOSTI SATELITA SA ZEMALJSKE STANICE

Za satelite u slobodno raspoređenim cirkularnim orbitama bio je uveden pojam površine međusobne vidljivosti* kao površine iznad koje će satelit biti vidljiv točkama na Zemlji sa koje je ta površina zajednička. Ovako definirana površina vezana je na Zemlju odnosno na zemaljske stanice, jer je određena lokacijom tih stanica i visinom orbite ali ne i promjenom položaja satelita. Satelit će biti vidljiv s obiju zemaljskih stanica, dok mu trag prelazi preko površine međusobne vidljivosti.

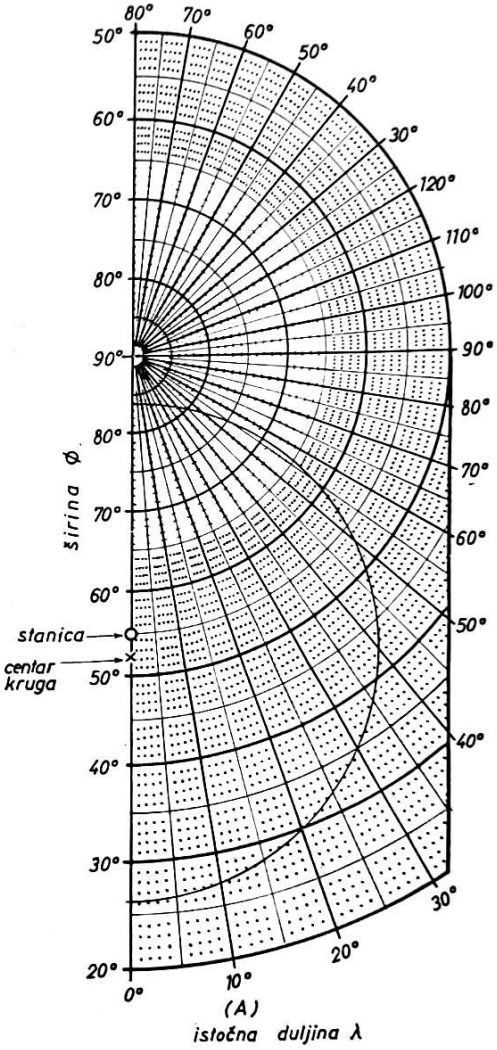


Slika 14.1

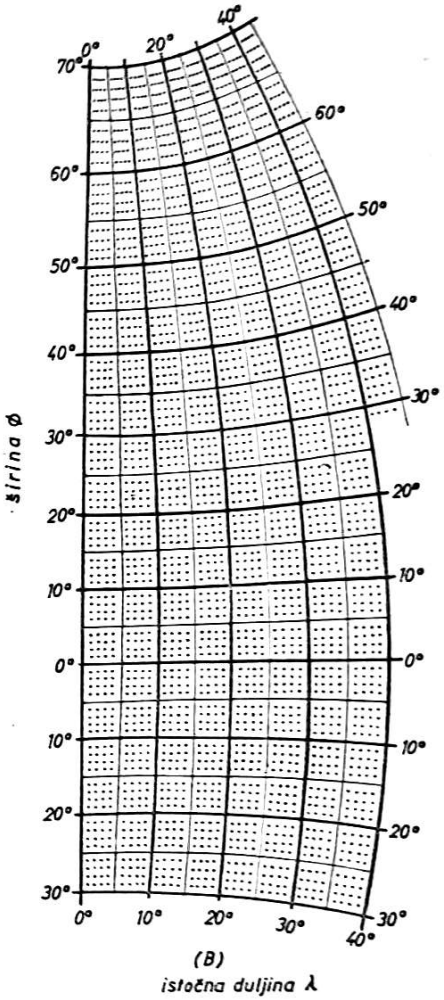
Ako je u igri više satelita, a vidjeli smo da su se i takve koncepcije pojavljivale kao rješenja, kontinuitet komunikacija moći će biti održan samo simultanim transferom svih veza na drugi satelit u momentu kad prvi iščezne iz zajedničke površine vidljivosti. Za sukcesivne transfere i opći slučaj bilo

* Mutual visibility area.

kakve orbite sukcesivni putevi satelita neće nužno zauzimati iste položaje kod transfera. Dosljedno tome neće, vjerojatno, ni površina preklapanja za sukcesivne transfere imati istu veličinu, oblik i položaj i vjerojatno će samo maleni dio površine biti zajednički svim sukcesivnim transferima.



Slika 14.2



Slika 14.3

Da dođemo do površine zajedničke vidljivosti moramo biti u stanju odrediti za svaku zemaljsku stanicu površinu vidljivosti za danu lokaciju i visinu satelita te minimalnu upotrebljivu visinu satelita iznad horizonta. Ako je stanica postavljena na točku koja ima duljinu 0^0 (ako je stvarna duljina bilo koja duljina, vrši se samo translacija dobivene krivulje po širini Φ_s do te duljine) a širinu Φ_s onda koordinate svih točaka (Φ i λ), koje zatvaraju krivulju — granicu površine vidljivosti — moraju odgovarati izrazu

$$\cos\lambda = \frac{\cos\varphi - \sin\Phi_s \sin\Phi}{\cos\Phi_s \cos\Phi}$$

gdje je φ centralni kut koji odgovara radiusu te površine. Ako je $\Delta\varphi$ kut koji označava minimalnu upotrebljivu visinu satelita iznad horizonta, onda je, kako smo vidjeli ranije (2.2.5a) i (2.2.6), vrlo približno*

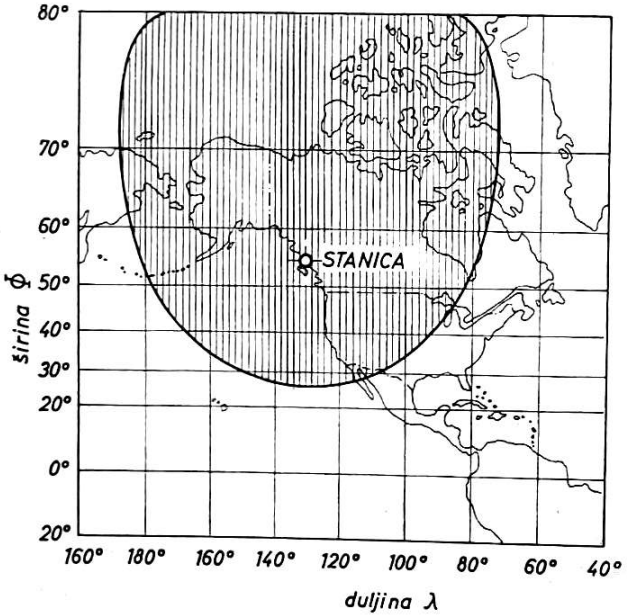
$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi$$

a

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{2} - \arcsin\frac{R}{R+h}$$

Kut φ možemo dobiti sa sl. 14.1 za razne h (u nM)**

Mjesto rješavanja gornjih odnosa računskim putem, može se problem riješiti i grafički primjenom diagrama sa slika 14.2 i 14.3. Procedura u oba slučaja je jednaka, samo će se slika 14.2 upotrebljavati za stanice na većim širinama a ona sa slike 14.3 za stanice bliže ekvatoru.



Slika 14.4

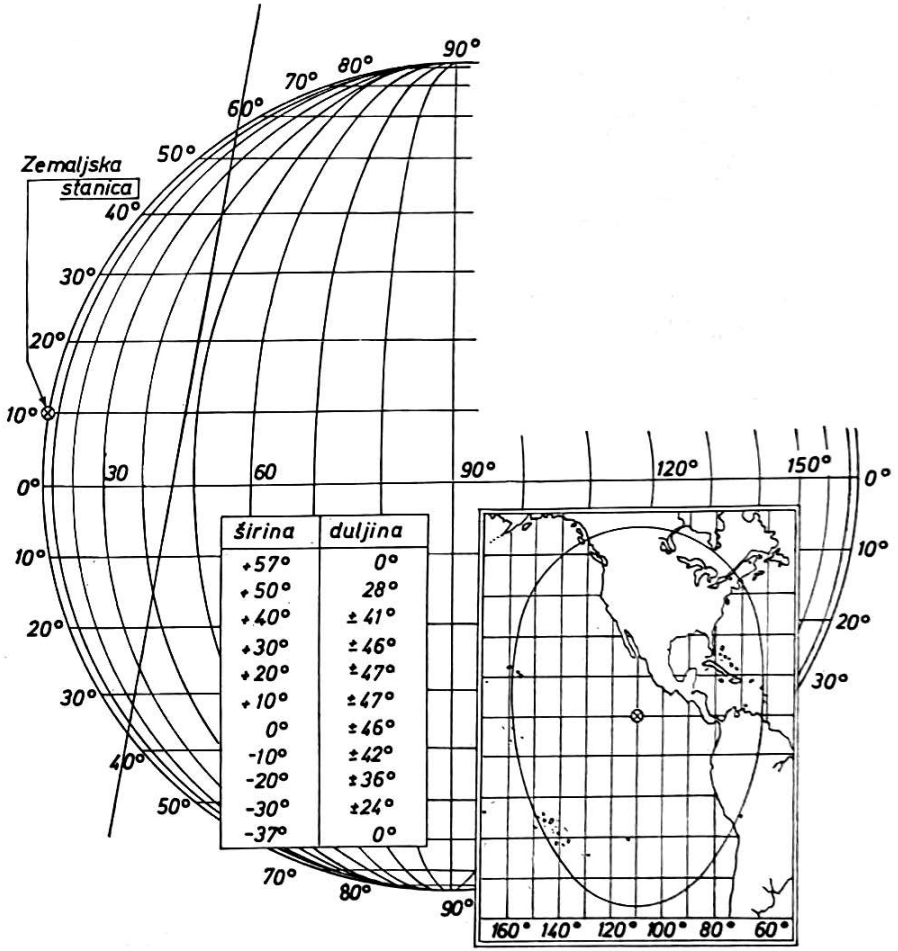
Ako je širina zemaljske stanice Φ_s a centralni kut φ, odrezat ćemo na meridijanu 0° duljine $\Phi_s + \varphi$ i $\Phi_s - \varphi$. Ako ovu duljinu podijelimo na pol, dobivamo središte kružnice iz kojeg možemo opisati kružnicu koja pokazuje površinu iznad koje je vidljiv satelit na visini h za stanicu određeno s Φ_s. Iz

* U (2) dan je izraz $\varphi = \arccos\{[R/(R+h)]\cos\Delta\varphi\} - \Delta\varphi$. On daje približno iste vrijednosti.

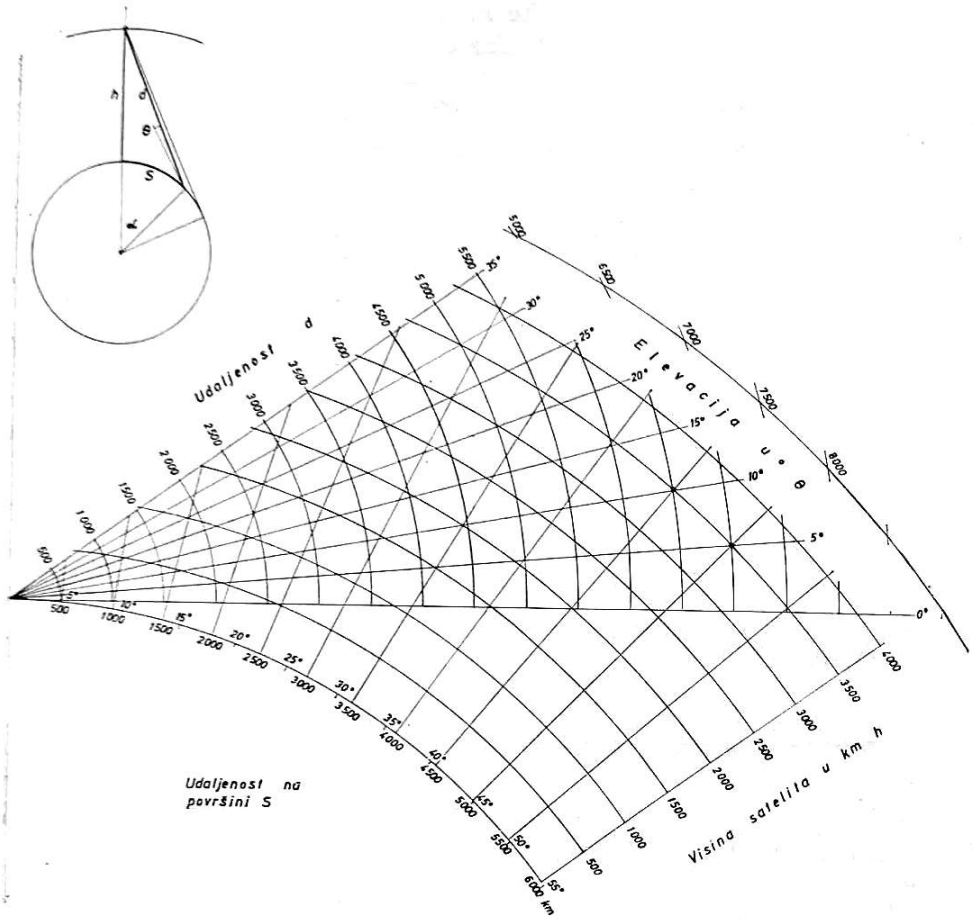
** 1 nM = 1853 m.

slike možemo odrediti pojedine točke kružnice pa ih onda prenijeti u kartu nakon što smo položaj zemaljske stanice ucrtali u tu kartu s pravim koordinatama. Naravno da i duljine pojedinih točaka moramo transportirati vodeći računa o realnim koordinatama stanice. Za primjer (2) koji je dan na slici 14.4 imamo kao koordinate kružnice, vrijednosti:

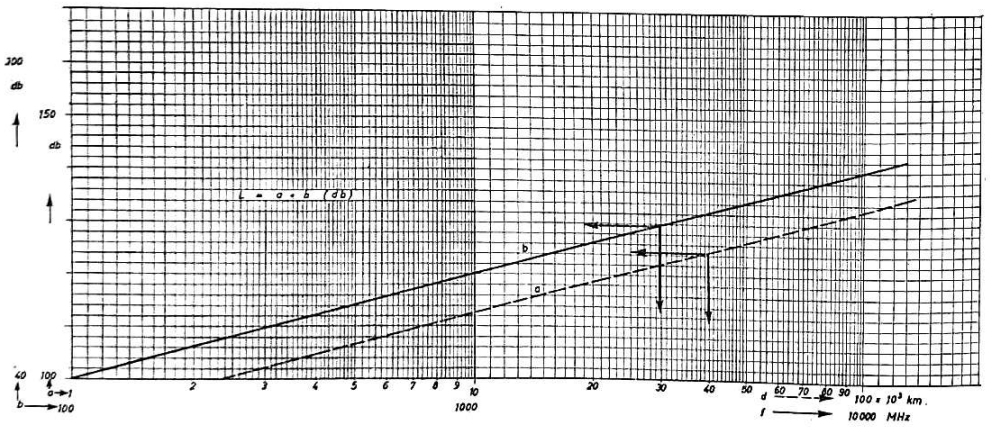
$\Phi = 84^0$ N	$\lambda = 0^0$
80^0 N	$\pm 46^0$
70^0 N	$\pm 57^0$
60^0 N	$\pm 54^0$
50^0 N	$\pm 47^0$
40^0 N	$\pm 37^0$
30^0 N	$\pm 20^0$
26^0 N	$\pm 0^0$



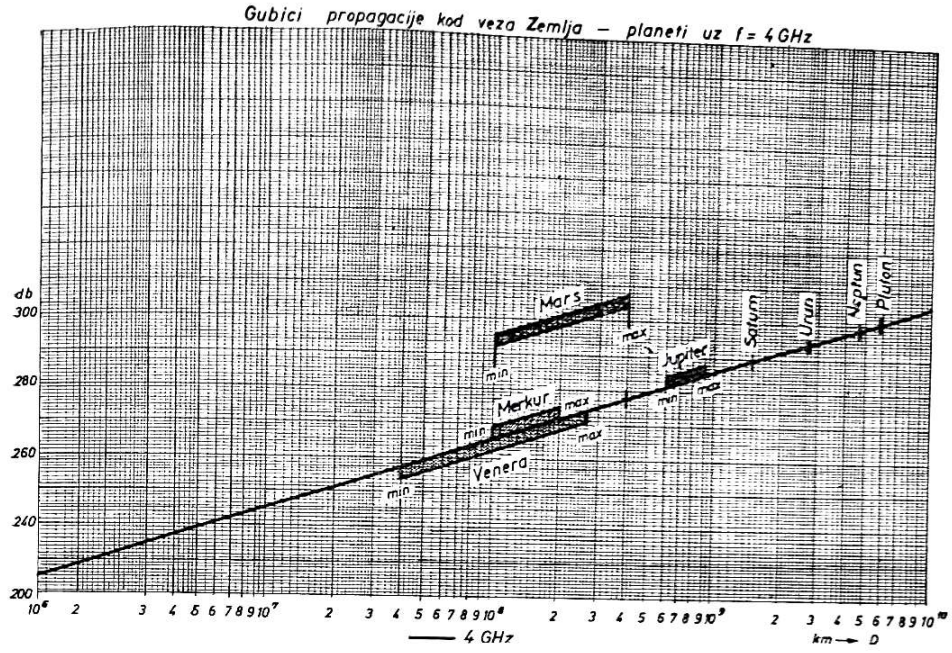
Slika 14.5



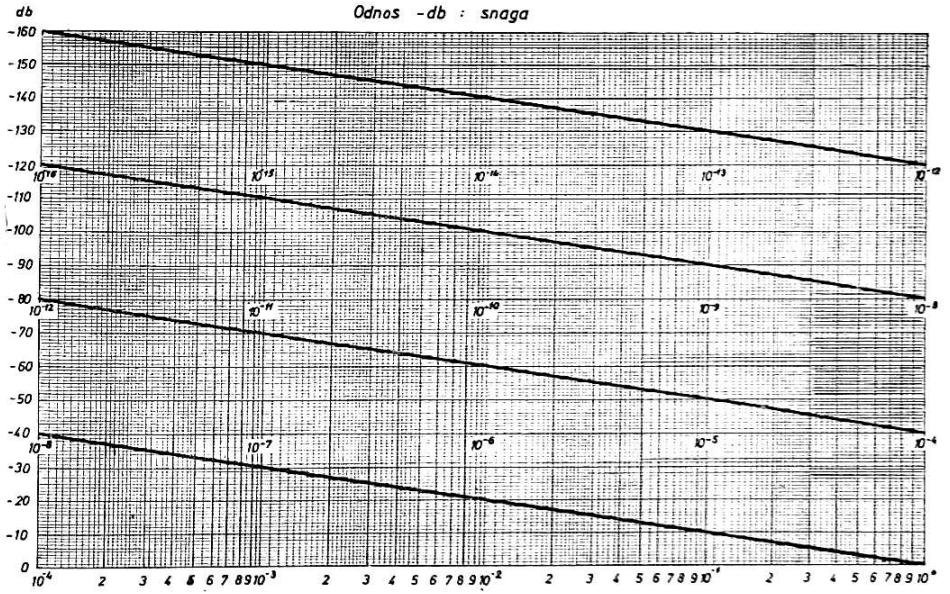
Slika 14.6



Slika 14.7



Slika 14.8



Slika 14.9

Ako kut φ prelazi vrijednost od 30⁰ može se ista površina odrediti postupkom prikazanim na slici 14.5 (4) koja je jasna sama po sebi.

I jedan i drugi od ovih grafičkih načina upotrebljivi su za kružne orbite i ne mogu se primjeniti, iz razumljivih razloga, za eliptične — posebice ne za izdužene eliptične — orbite.

Osnovne odnose između visine satelita (h), udaljenosti do ruba područja pokrivanja (d), duljine luka na površini Zemlje (s), centralnog kuta (α) i elevacije (Θ) vidimo na slici 14.6 napravljenoj prema [3].

GUBICI KOD PROPAGACIJE

Na slici 14.7 vidimo gubitke kod propagacije dane kao

$$L = a + b \quad \text{(db)}$$

gdje je *a* član koji sadrži udaljenost *d* i konstantu 32,44 db, a *b* član koji sadrži frekvenciju *f* iz izraza (13.2.3). Diagram vrijedi za udaljenosti od cca 2350 km do 100.10^3 km i frekvencije od 100 do 10 000 MHz. Na slici je primjer za $d = 4.10^4$ km i $f = 3.10^3$ MHz. Iz diagrama je vrlo približno L = 194,1 db (račun daje 193,96 db).

Na slici 14.8 dana su gušenja kod propagacije na relacijama Zemlja — planeti, uz frekvenciju 4 GHz. Udaljenosti planeta uzete su iz (5).

PRETVARANJE db : ODNOS SNAGE

Na slici 14.9 dani su odnosi db: snaga za vrijednosti od 10^{-16} do 1 odnosno od — 160 db do 0 db.

NOMENKLATURA POJASEVA FREKVENCIJE

Spektar frekvencija razdijeljen je na 9 pojaseva označenih cijelim brojem. Frekvencije su izražene u kHz do uključivo 3000 kHz, u MHz do uključivo 3000 MHz i u GHz iznad toga.

(Prema Pravilniku za radiokomunikacije)

Pojas	Granice*	Odgovarajući naziv za valne duljine
4	3 do 30 kHz	misijametarski valovi
5	30 do 300 kHz	kilometarski valovi
6	300 do 3000 kHz	hektometarski valovi
7	3 do 30 MHz	dekametarski valovi
8	30 do 300 MHz	metarski valovi
9	300 do 3000 MHz	decimetarski valovi
10	3 do 30 GHz	centimetarski valovi
11	30 do 300 GHz	milimetarski valovi
12	300 do 3000 GHz ili 3 THz	decimilimetarski valovi

*) donja granica isključena a gornja uključena

Simboli su

k = kilo	$= 10^3$
M = mega	$= 10^6$
G = giga	$= 10^9$
T = tera	$= 10^{12}$

pojas 4 = VLF	pojas 8 = VHF
pojas 5 = LF	pojas 9 = UHF
pojas 6 = MF	pojas 10 = SHF
pojas 7 = HF	pojas 11 = EHF

pojas 12 = EHFI

U upotrebi su često i USA vojne oznake.

pojas P	225— 390 MHz
pojas L	390— 1.530 MHz
pojas S	1.550— 5.200 MHz
pojas X	5.200—10.900 MHz
pojas K	10.900—36.000 MHz
pojas Q	36.000—46.000 MHz
pojas V	46.000—56.000 MHz

LITERATURA:

(1) Satellite broadcasting service areas, BBC Research dept no 1970/3.

(2) *Levine, Welch:* Ploting Goverage Cireles for Satellite communications, Electronics 24 januar 1964.

(3) *Franklin el. al:* System for mass producing topside ionograms, PIRE, juni 1969. str. 931.

(4) The Microwave Engineers Handbook and Buyers Guide, 1963 str. 154.

(5) CCIR doc IV/56 od 11. VI 1968.

15.

Rječnik

Nazivi i definicije uzeti su iz Pravilnika o radiokomunikacijama 1959, parcialne revizije istog Pravilnika iz 1963, prijedloga koji su napravljeni na Plenarnom zasjedanju CCIR-a u Oslu 1966 i na Interimnom zasjedanju CCIR-a u Palmi 1968.

Aktivni satelit — zemljin satelit koji nosi stanicu namijenjenu emitiranju ili reemitiranju radiokomunikacionih signala.

Apoaster — točka orbite satelita ili planeta koja je najudaljenija od gravitacionog centra glavnog tijela.

Apogej — točka orbite satelita Zemlje najudaljenija od centra Zemlje. Apogej je očito apoaster zemljinog satelita.

Cirkularna (kružna) orbita — orbita satelita kod koje udaljenost centara gravitacije satelita i glavnog tijela ostaje konstantna.

Čvor uzlazni (silazni) — točka u kojoj orbita satelita ili planeta probada glavnu ravninu koja sadrži dvije od koordinata referentnog sistema dok je treća koordinata satelita ili planeta uzlazna ili silazna za vrijeme prolaza kroz ovu točku. Za zemaljski satelit je glavna ravnina referentnog sistema ravnina ekvatora a treća koordinata raste od južne hemisfere prema sjevernoj.

Čvorni period — vremenski interval između dvaju uzastopnih prolaza satelita ili planeta kroz uzlazni čvor.

Daleki prostor — prostor udaljen od Zemlje koliko je udaljen Mjesec ili više.

Direktna orbita satelita — orbita satelita takva, da se projekcija centra gravitacije satelita na glavnu ravninu sistema kreće u direktnom smjeru. Po dogovoru je direktni smjer određen prema sjevernom polu glavnog tijela i ovaj je određen dogovorno. Za zemaljski satelit direktni smjer je smjer okretanja Zemlje.

Ekvatorijalna orbita — orbita satelita kod koje se ravnina orbite poklapa s ekvatorijalnom ravninom glavnog tijela.

Elementi orbite — parametri koji omogućuju određivanje oblika, dimenzija i položaja orbite jednog tijela u prostoru kao i položaj u vremenu tijela na orbiti u odnosu na referentnu točku u specificiranom referentnom sistemu.

Eliptička orbita — orbita satelita kod koje udaljenost centra gravitacije satelita i glavnog tijela nije konstantna.

Evropska radiodifuzna zona — dio Regije I ograničen na istoku 40° dužine, a na jugu 30° sjeverne širine. U ovu zonu ne ulazi dio Arabije i Saudi Arabije koji leži unutar spomenutih granica.

Glavno tijelo — tijelo koje u biti određuje gibanje satelita.

Individualni prijem (u radio difuznoj satelitskoj službi) — prijem radio difuznih emisija sa stanice na satelitu uobičajenim sredstvima za prijem i antenama malih dimenzija (vidi: *zajednički prijem*).

Koordinaciona krivulja — linija koja povezuje točke u svim azimutima oko zemaljske stanice, udaljene od te stanice za iznos koji odgovara koordinacionoj udaljenosti.

Koordinaciona udaljenost — udaljenost izmjerena od zemaljske stanice u određenom azimutu takova da će jedna stanica na Zemlji, koja dijeli istu frekvenciju moći prouzrokovati ili smetnje čiji će nivo preći dozvoljenu granicu ili biti smetana na isti način.

Koordinaciona zona — zona koja se nalazi oko jedne zemaljske stanice unutar krivulje koordinacije.

Kružna orbita — vidi: Cirkularna orbita.

Meteorološka satelitska služba — prostorna služba u kojoj se rezultati meteoroloških opservacija, izvršenih putem uređaja postavljenih na zemaljskom satelitu, prenose na zemaljske stanice s prostornih stanica smještenih na tom satelitu.

Nageta orbita — orbita satelita koja nije ekvatorijalna.

Nagib (kut nagiba) orbite (satelita) — kut između ravnine orbite satelita i glavne ravnine referentnog sistema. Za satelit koji je blizu glavnom tijelu uzima se kao glavna ravnina, ekvatorijalna ravnina glavnog tijela.

Neometana orbita (satelita) — orbita satelita u idealnom slučaju, kad bi satelit bio podvrgnut samo privlačenju glavnog tijela, pod pretpostavkom da je koncentrirano u svom centru gravitacije; to je čunjosječnica u čijem je jednom žarištu glavno tijelo.

Orbita — trajektorija koju u prostoru opisuje centar gravitacije satelita ili drugog tijela, pod djelovanjem prirodnih sila kao što su privlačenje glavnog tijela gravitacijom, djelovanjem drugih tijela, tlak radijacija i atmosfersko trenje.

Pasivni satelit — zemljin satelit namijenjen emitiranju radiokomunikacionih signala refleksijom.

Periaster — točka orbite satelita ili planeta koja je najbliža gravitacionom centru glavnog tijela.

Perigej — točka orbite satelita Zemlje najbliža središtu Zemlje. Perigej je očito periaster zemljinog satelita.

Period — vremenski interval između dvaju uzastopnih prelaza satelita ili planeta kroz periaster.

Podsinhroni satelit — satelit kojemu je sideralni period rotacije glavnog tijela cijeli višekratnik srednjeg sideralnog perioda revolucije satelita oko glavnog tijela.

Polarna orbita — nageta orbita kojoj je nagib 90°. Ravnina orbite sadržava polarnu os glavnog tijela.

Prostorna sonda — prostorno vozilo koncipiramo tako, da u glavnome izbjegne djelovanje sile teže Zemlje i izvrši određenu misiju u prostoru.

Prostorna stanica — stanica iz službe radiokomunikacija u prostoru, smještena na objekt koji se nalazi, koji je određen da ode ili koji je bio iza granica glavnog dijela zemaljske atmosfere.

Prostorna stanica satelita za radionavigaciju — prostorna stanica službe za radionavigaciju putem satelita, smještena na jednom zemaljskom satelitu.

Prostorna stanica satelita za telekomunikacije — prostorna stanica iz službe telekomunikacija putem satelita, smještena na zemljinom satelitu.

Prostorna stanica za prostorna istraživanja — prostorna stanica iz službe prostornih istraživanja.

Prostorni sistem — svaka skupina zemaljskih i prostornih stanica koje su u međusobnoj suradnji sa svakom, da osiguraju jednu prostornu službu, a mogu sadržavati i prostorne objekte koji reflektiraju telekomunikacione signale.

Prostorno vozilo — označava svaki tip prostornog vozila uključujući zemaljske satelite ili sonde za daleke prostore, s posadom ili bez posade, jednako kao i rakete i balone u velikim visinama, koji ulaze u vanjsku atmosferu ili u prostor.

Radioastronomija — astronomija bazirana na prijemu radioelektričkih valova kozmičkog porijekla.

Ravnina orbite — ravnina u kojoj je sadržan radius vektor i vektor brzine satelita, pri čemu je referentni sistem onaj specificiran za određivanje elemenata orbite.

Regija I — na Internacionalnoj konferenciji za telekomunikacije i radiokomunikacije u Atlantic City-u 1947. utvrđena regija, koja obuhvaća čitavu Evropu s Islandom, Afriku, čitavi Sovjetski Savez uključujući i Mongolsku Republiku, Tursku, Siriju, Liban, Izrael, Arabiju i dio Irana. U ovu regiju spada i Japan.

Retrogradna orbita satelita — orbita satelita takva da se projekcija centra gravitacije satelita na glavnu ravninu sistema kreće u retrogradnom smjeru (vidi direktna orbita).

Satelit — tijelo koje kruži oko drugog (na primjer planet) i čije je gibanje u biti određeno, i to trajno, silom privlačenja ovih tijela; iz proširenja definicije slijedi da i jedan prirodni satelit može imati satelita. (Tijelo koje odgovara ovoj definiciji a kruži oko Sunca naziva se planetom ili planetoidom).

Servis telekomunikacija putem satelita — prostorni servis između zemaljskih stanica kad se pri tome primjenjuju aktivni ili pasivni sateliti za izmjenu komunikacija fiksnih ili mobilnih službi ili prostorni servis između zemaljske stanice i stanica koje se nalaze na aktivnim satelitima u svrhu izmjene komunikacija mobilnih službi, s ciljem da se te komunikacije vrate prema stanicama mobilnih službi ili preuzmu od njih.

Servis za istraživanje prostora — prostorni servis u kome se upotrebljavaju prostorne letilice ili drugi objekti u prostoru za znanstvena ili tehnička istraživanja prostora.

Sinhroni satelit — satelit čiji je sidoralni period revolucije oko glavnog tijela jednak sideralnom periodu rotacije glavnog tijela oko svoje osi. Sinhroni satelit Zemlje bit će sinhroniziran na sideralni period Zemlje odnosno na srednji sideralni dan koji traje 23 sata i 56 minuta.

Sistem satelita — svaki sistem stanica koje surađuju međusobno i osiguravaju određeni prostorni servis a sadrži jedan ili više aktivnih ili pasivnih satelita.

Služba radiodifuzije sa satelita — prostorni servis u kojem su signali emitirani ili reemitirani prostornim stanicama ili emitirani refleksijom s objekta koji su u orbiti oko Zemlje, namijenjen direktnom prijemu širokog općinstva.

Služba radionavigacije putem satelita — servis koji se koristi prostornim stanicama smještenim na zemljine satelite da osigurava radionavigaciju i uključuje, u nekim slučajevima, emitiranje ili reemitiranje dodatnih informacija potrebnih za ovu navigaciju.

Službe radioastronomije — službe koje involviraju upotrebu radioastronomije.

Službe radiokomunikacija u prostoru —
— između zemaljskih i prostornih stanica
— između prostornih stanica
— između stanica na Zemlji, ukoliko su signali prenešeni posredovanjem prostorne stanice ili reflektirani s objekata u prostoru, s time da se isključuje posredovanje ionosferom ili zemaljskom atmosferom, refleksijom ili difuzijom.

Stacionarni satelit — sinhroni satelit s ekvatorijalnom cirkularnom direktnom orbitom. Stacionarni satelit ostaje fiksan u referentnom sistemu vezanom na glavno tijelo.

Visina apogeja (perigeja) — visina apogeja (perigeja) iznad neke specificirane referentne površine, koja treba da predstavlja površinu Zemlje.

Zajednički prijem (u radio difuznoj satelitskoj službi) — prijem radio difuznih emisija stanice na satelitu sredstvima za prijem koji mogu, u pojedinim slučajevima biti kompleksna i imati antene većih dimenzija od onih za individualni prijem, a mogu se iskorištavati:
— po grupama gledalaca na mjestu prijema
— preko sistema za distribuciju u jednoj ograničenoj zoni

Zemaljska stanica — stanica iz službe radiokomunikacija u prostoru smještena na površini Zemlje, pri čemu se kao površina Zemlje podrazumijevaju i brodovi i avioni.

Zemaljska stanica za komunikacije putem satelita — zemaljska stanica iz službe telekomunikacija putem satelita.

Zemaljska stanica za prostorna istraživanja — zemaljska stanica iz službe za prostorna istraživanja.

Zemaljska stanica za radionavigaciju putem satelita — zemaljska stanica iz službe za radionavigaciju putem satelita.

16.

Kratice

ATCOS Atmospheric Composition Satellite
ATS Applications Technology Satellite
CAER Conference administrative extraordinaire des radiocommunications
CDM Code Division Multiplex
CEECLES Organisation Eurepeenne pour la mise au point et la Construction de lanceurs d'Engines Spatiaux (= ELDO)
CETS Conference Europeenne des Telecommunications par Satelittes (= European Conference on Telecommunications Satelittes)
COMSAT Communications Satelittes Corporation
DATS Mechonically Despun Antenna Test Satellite
EGRS Experimental Geodesic Research Satellite
EIRP Equivalent isotropically radiated power
ELDO European space vehicle Launcher Development Organisation (= CECLES)
ERS Experimental Research Satellite
ESRO European Space Research Organisation
ESSA Environmental Survey Satellite
FDM Frequency Division Multiplex
IDCSP Initial Defense Communication Satellite Project
IFRB International Frequency Registration Board
IMP Interplanetary Monitoring Platform
ISIS International Satelite for Ionospheric Studies
LES Lincoln Experimental Satellite
NASA National Aeronautics and Space Administration
NASCOM NASA telecommunications network
NDS (= VELA) Nuclear Detection Satellite
OAO Orbiting Astronomical Observatory
OGO Orbiting Geophysicale Observatory
OSO Orbital Solar Observatory
OU Orbital Vehiche
RAE Radio Astronomy Explorer
SECOR Sequential Collation of Range
SNAP System for Nuclear Auxiliari Power
STAR Satellite Telecommunication with Automatic Routing
STEM Storable Tube Extendible Member, Storable Extendible Member
TDM Time Division Multiplex
TDMA Time Division Multiplex Access
VisTa Visual Talking

17.

Popis oznaka

A	efektivna površina
b	širina pojasa u Hz
B	širina pojasa u MHz, geografska širina mjesta prijema na Zemlji, faktor transfera umanjenja smetnji
c	brzina svjetla
d	udaljenost općenito
D	promjer aperture antene
E	jakost polja
f	frekvencija
f_m	najviša modulaciona frekvencija
F	faktor šuma
F_c	centrifugalna sila
F_g	sila gravitacije
F_M	faktor zaštite ternom (db)
g	dobitak antene općenito (faktor)
g_R	dobitak antene prijemnika (faktor)
g_T	dobitak anfene odašiljača (faktor)
G	dobitak antene u db ($G = 10 \log g$)
h	visina satelita iznad Zemlje
i	inklinacija ravnine putanje
k	Boltzman-ova konstanta
l	faktor gušenja, duljina luka na maksimalnom krugu Zemlje
L	gušenje u db
m	masa satelita
M	masa Zemlje
O	površina kugline kalote
p	snaga u W
p_R	snaga dovedena prijemniku u W
p_T	snaga odašiljača u W
P	snaga u dbW
r	udaljenost
R	Rayleigh-ova udaljenost, radius Zemlje
S	gustoća energije, »spill-over«, signal (snaga u dbW), udaljenost na površini zemlje
t	vrijeme ophodnje satelita
t_a	prividno vrijeme ophodnje
t_z	period rotacije Zemlje

T^0	temperatura u ^0K
v	brzina
α	kut pod kojim se vidi satelit, nagib ravnine orbite prema ekvatoru
β	kut pod kojim se vidi Zemlja sa satelita
δ	polovina širine snopa antene, kut satelita
Δ	razlika u geografskoj duljini između mjesta prijema i mjesta kome je satelit u zenitu
ΔF	devijacija
$\Delta\varphi$	minimalni kut pod kojim se satelit vidi iznad horizonta
ε	kut pod kojim se stacionarni satelit vidi iznad horizonta (elevacija) s pojedinih točaka na Zemlji
η	stupanj djelovanja
Θ	kut iznad horizonta pod kojim se iz točke na Zemlji vidi satelit, kut elevacije glavnog snopa antene
λ	duljina vala, geografska duljina
σ	refleksna površina
Σ	suma
φ	centralni kut Zemlje
Φ	geografska širina
ψ	kut u dijagramu isijavanja antene prema osi glavnog snopa

SADRŽAJ

Strana

Umjesto predgovora 5
1. Uvod 9
2. KLASIFIKACIJA KOMUNIKACIONIH SATELITA 15
2.1. Općenito 15
2.2. Geometrijski odnosi 22
3. ODNOS PASIVNI-AKTIVNI SATELITI 33
4. IZBOR FREKVENCIJA ZA SPACIALNE KOMUNIKACIJE . . 47
5. STABILIZACIJA I PRAĆENJE SATELITA 59
6. ANTENE ZA SATELITSKE VEZE 67
7. TEHNOLOŠKI PROBLEMI 87
7.1. Napajanje električnom energijom 87
7.2. Kontrola temperature i odvođenje topline 94
7.3. Antene na satelitima 98
7.4. Rakete vektori 107
8. OGRANIČENJE SNAGE ODAŠILJAČA NA SATELITIMA . . 115
9. MAKSIMALNA DOZVOLJENA GUSTOĆA FLUKSA I DISPERZIJA ENERGIJE 119
9.1. Određivanje koordinacione udaljenosti 122
10. ZAŠTITNE MJERE KOD ZEMALJSKIH STANICA 135
11. VRIJEME PROPAGACIJE KOD KOMUNIKACIONIH SATELITA 139
12. VIŠESTRUKI PRISTUP 143
12.1. Općenito 143
12.2. Opis nekih izvedenih komunikacionih satelita 148
13. RADIO-DIFUZNI SATELITI 153
13.1. Općenito 153
13.2. Proračuni i primjeri proračuna 162
14. DODATAK 181
15. RJEČNIK 191
16. KRATICE 195
17. POPIS OZNAKA 197

Izdaje
Radio-televizija Zagreb

Za izdavača
Vladimir Mirković

Naklada
3000 primjeraka

Tisak
VJESNIK, Zagreb, Lj. Gerovac 1